

T U T T O

STUDIO ~ RIEPILOGO ~ SINTESI

# SCIENZE DELLA TERRA

SCHEMI E TAVOLE DI SINTESI, DISEGNI ESPLICATIVI

PER MEMORIZZARE RAPIDAMENTE I CONCETTI-GUIDA

---

DELLE SCIENZE DELLA TERRA. STUDIARE IN SINTESI

---

ASTRONOMIA, GEOLOGIA, MINERALOGIA, METEOROLOGIA

---

E IDROLOGIA, GEOMORFOLOGIA ED ECOLOGIA.

---

**DeAGOSTINI**

T U T T O  
S T U D I O ~ R I E P I L O G O ~ S I N T E S I

# SCIENZE DELLA TERRA

---

SCHEMI E TAVOLE DI SINTESI, DISEGNI ESPLICATIVI



**DeAGOSTINI**

SETTORE DIZIONARI E OPERE DI BASE

*Responsabile editoriale:* Valeria Camaschella

*Coordinamento redazionale:* Davide Bernardini

*Coordinamento grafico:* Marco Santini

*Testi:* Laura Massaglia

*Revisione:* Mariateresa Gariboldi; Ugo Scaioni

*Disegni:* Banca dati Opere IGDA, Vittorino Monzini

*Realizzazione editoriale:* Studio 3

*Aggiornamento della presente edizione:* Paolo Schiannini

*Copertina:* Marco Santini

ISBN 978-88-418-6943-7

© Istituto Geografico De Agostini S.p.A., Novara 1999, 2006

[www.deagostini.it](http://www.deagostini.it)

Redazione: corso della Vittoria 91, 28100 Novara

Prima edizione elettronica, marzo 2011

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta, memorizzata o trasmessa in alcuna forma e con alcun mezzo, elettronico, meccanico o in fotocopia, in disco o in altro modo, compresi cinema, radio, televisione, senza autorizzazione scritta dell'Editore.

Le copie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto all'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941, n. 633. Le riproduzioni per finalità di carattere professionale, economico o commerciale, o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate a seguito di specifica autorizzazione rilasciata da AIDRO, corso di Porta Romana 108, 20122 Milano, e-mail [segreteria@aidro.org](mailto:segreteria@aidro.org), sito web [www.aidro.org](http://www.aidro.org)

***L**e scienze della Terra riuniscono in un'unica denominazione un insieme di discipline (geologia, geofisica, climatologia, oceanografia, geografia fisica e astronomica, paleontologia e biogeografia, e altre) che hanno come oggetto comune di studio il nostro pianeta, del quale ciascuna affronta tradizionalmente uno specifico ambito di indagine. L'ampliamento di conoscenze e le scoperte maturate nell'ultima metà del '900, grazie anche all'impiego di sempre più progrediti mezzi di ricerca, ha permesso la raccolta di una serie impressionante di nuovi dati. Ciò ha costretto gli studiosi a riscrivere la lunga e complessa storia dell'origine e dell'evoluzione del nostro pianeta e ad avanzare nuove spiegazioni per molti fenomeni naturali, legati tra loro da una complessa trama di relazioni. Si è trattato di una vera "rivoluzione" nelle conoscenze della Terra, che ha portato a considerare il nostro pianeta come un "sistema" il cui comportamento sia interpretabile per mezzo di un modello generale. Uno dei pilastri di questa concezione unificante è la teoria della "tettonica a zolle", che ha permesso di ricostruire il "ciclo delle rocce" inquadrando in un unico ampio contesto fenomeni in precedenza slegati, quali i terremoti, le eruzioni vulcaniche, la nascita delle montagne e la formazione dei continenti e degli oceani. Tutto Scienze della Terra si propone l'obiettivo di fornire i lineamenti essenziali per acquisire un bagaglio di conoscenze di base degli studi multidisciplinari che concorrono a spiegare l'origine della Terra, la sua struttura interna, le trasformazioni da essa subite nel tempo e il possibile destino che l'attende, indissolubilmente legato a quello dell'uomo. I principali argomenti trattati includono: cenni di astronomia (coordinate celesti, stelle e galassie, sistema solare, origine dell'universo); il pianeta Terra (geofisica e rappresentazione cartografica); mineralogia; la tettonica a zolle, il vulcanismo e i terremoti; ere geologiche e fossili; atmosfera (meteorologia e climatologia) e idrografia (oceanografia, acque interne e ghiacciai); geomorfologia (fenomeni erosivi e suoli); l'uomo e il rischio naturale, le risorse minerarie.*

# Guida alla consultazione

Sintesi introduttiva al capitolo

Tabella riassuntiva

## 19 Idrosfera: le acque marine

L'insieme delle acque presenti sulla Terra prende il nome di **idrosfera**: per la maggior parte essa è formata dai  **mari e oceani**, che **coprono circa tre quarti della superficie terrestre**; la scienza che studia gli oceani e i mari dal punto di vista geomorfologico, chimico-fisico e biologico è l'**oceanografia**. Le **caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua di mare**, quali la **salinità**, la **densità**, la **temperatura**, la **pressione**, il **colore** e la **trasparenza**, influenzano alcuni fenomeni che in essa si verificano o anche la **vita degli organismi** che vi abitano. Le **acque oceaniche e marine** sono sottoposte a diversi tipi di movimenti: **costanti**, le **correnti**; **irregolari**, le **onde**; **periodici**, le **maree**. Le numerose esplorazioni oceanografiche degli anni '60 e '70 hanno permesso di descrivere la **morfologia dei fondali marini**, alquanto varia e complessa.

### 19.1 Oceani e mari

L'acqua è presente sulla Terra nei tre stati fisici: liquido (nei mari, negli oceani, nei laghi, nei fiumi ecc.), solido (nei ghiacciai) e aeriforme (vapor d'acqua nell'atmosfera). Tutte le acque presenti sulla Terra costituiscono una sorta di involucro a cui si dà il nome di **idrosfera**: la maggior parte dell'idrosfera è costituita da oceani e mari, che nel loro complesso occupano oltre il 70% della superficie terrestre. Più precisamente, si indica col termine **oceano** un'ampia distesa di acqua che circonda e separa le masse emerse dei continenti, mentre il termine **mare** è riservato a estensioni più limitate di masse d'acqua, generalmente circondate da terre emerse o comunque adiacenti a esse (in alcuni casi il termine mare indica bacini chiusi, per esempio, il Mar Caspio, che non comunicano direttamente con i mari aperti). La scienza che studia gli oceani e i mari dal punto di vista morfologico, chimico, fisico e biologico è l'**oceanografia**: essa si occupa della morfologia dei fondali oceanici, della natura e del tipo di sedimenti che vi si depositano, delle caratteristiche fisiche e chimiche delle acque e dei loro movimenti, nonché delle interazioni fra oceani e atmosfera. Come si è visto nel capitolo 12, le esplorazioni oceanografiche hanno inoltre permesso di raccogliere molte informazioni sulla struttura dei fondali oceanici, che hanno contribuito alla formulazione della teoria della tettonica delle placche.

Oceano

Mare

L'oceanografia

244

Note a margine per la rapida individuazione e memorizzazione dei temi principali

Testo con le parole e i concetti chiave evidenziati in **nero**

Il testo è articolato in modo da favorire l'inquadramento generale dei temi e la memorizzazione rapida dei tratti salienti e delle strutture portanti delle discipline in cui si articolano le scienze della Terra. I singoli **capitoli** sono aperti da un **cappello introduttivo** che fornisce un rapido inquadramento generale dell'argomento trattato. Le frequenti **note a margine** permettono la rapida individuazione dei temi principali e agevolano la loro ricapitolazione. All'interno del testo sono **evidenziati in carattere nero più marcato** i concetti e le parole che è particolarmente utile ricordare. Numerosi **disegni esplicativi e tabelle**

22 - Il suolo

Tabella 22.1 La classificazione dei suoli

tipi	caratteristiche
non evoluti	a minerali grezzi, presenti nelle regioni artiche e desertiche
poco evoluti	sono suoli giovani, che giacciono direttamente su una roccia madre silicea, tipici delle regioni di alta montagna
calcarei	si formano su rocce ricche in carbonato di calcio. Tra i suoli calcarei vi sono i <b>certenzuoli</b> , terre nere di fertilità eccezionale, che si trovano nelle steppe della Russia meridionale. Si formano nella zona temperata continentale a scarse piogge (meno di 400 mm all'anno), dove vi è una fitta copertura di graminacee xerofile che forniscono abbondante materiale organico, ricco di calcio. Un altro tipo di suolo calcareo è il <b>rendzina</b> , che si può formare in qualunque tipo di clima. È costituito da un solo orizzonte con copertura erbosa secca, in quanto manca di riserve di acqua
evoluti a muli	un tipo di humus della zona temperata, caratteristico delle foreste di latifoglie
evoluti a podsol	tipici climi umidi e temperati freddi, caratterizzati dalla presenza di un orizzonte grigio chiaro che contiene solo silice, che è sostituito a un orizzonte organico formato da sostanze vegetali non totalmente decomposte. Costituiscono la metà dei terreni europei e in Italia si trovano ai piedi delle Alpi e in diverse aree della pianura
lateritici	molto ricchi in ossidi di ferro o di alluminio, che si formano in climi caldi con alternanze di periodi secchi e umidi, sono tipici dei territori tropicali deforestati
alamosi	caratterizzati dalla presenza di un livello di sale
idromorfi	caratterizzati dalla presenza temporanea o permanente dell'acqua. In questo tipo di suoli vi è sempre un orizzonte nel quale l'elevato grado di umidità porta a una forte concentrazione di argilla e di ossidi di ferro, denominato <b>orizzonte glei</b>
idromorfi organici	caratterizzati da un intreccio di fibre e frammenti di vegetali più o meno carbonizzati con un'elevata percentuale di acqua. Da questi suoli possono trarre origine le torbe

mulano in loco, ma vengono facilmente allontanati dalla forza di gravità o asportati dalle acque dilavanti. In simili situazioni non possono formarsi suoli di notevole spessore; il materiale asportato può accumularsi alla base del pendio, dando origine alla **coltre colluviale**. Altre volte può arrivare fino alle acque inalterate del reticolo idrografico, essere trasportato dai fiumi sotto forma di torbida, e successivamente, essere sedimentato formando una **coltre alluvionale**. In zone pianeggianti possono invece formarsi suoli di spessore maggiore, poiché i materiali di degradazione della roccia rimangono in loco e subiscono un'ulteriore alterazione anche a opera di organismi viventi.

### 22.2 La composizione dei suoli

I suoli sono dei miscugli eterogenei, formati da una parte solida, distinta in componente minerale, o inorganica, e componente organica, da una parte liquida, acqua, e da una componente gassosa, aria.

295

## Riquadro di approfondimento

23 - L'uomo e il rischio naturale

forte energia cinetica, il materiale franoso può raggiungere la base del versante e risalire in parte (il pendio opposto della valle, lungo la diga provvisoria (v. riquadro).

### CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE

A seconda del tipo di materiale che si distacca e del modo in cui avviene lo spostamento, si possono distinguere diversi tipi di frane.

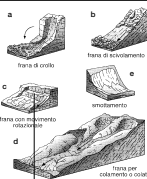
**Frane di crollo:** consistono nella caduta improvvisa di masse di roccia coerente e fratturata, che si stacca secondo piani preesistenti fortemente verticalizzati. Il materiale si accumula in un ammasso di blocchi a spigoli vivi alla base del versante, che in genere è a forte pendenza (fig. a).

**Frane di scivolamento:** il piano di distacco di norma coincide con una superficie di discontinuità del versante (litoclasti o faglia). La posizione del piano più idonea al movimento è a franapoggio, meno inclinato del pendio; il collasso del materiale soprastante è favorito dalla percolazione dell'acqua lungo fessure a monte fino alla superficie predisposta alla rottura. Questo lubrifica la superficie di contatto e predispone per lo scorrimento il pacchetto

di materiali soprastante (fig. b). **Frane con movimento rotazionale:** il distacco avviene lungo una superficie di deformazione, in genere curva. Interessano materiali semicohesivi e si manifesta quando viene superata la resistenza al taglio del materiale costituente il versante (fig. c).

**Frane per colamento:** sono tipiche delle argille imbevute d'acqua. La colata è in genere lenta e duravole nel tempo. Sono sovente molto grandi e possono interessare interi versanti. Il piano di stacco è incerto; si mobilita periodicamente in occasione di eventi pluviometrici (fig. d).

**Smottamenti:** sono piccole frane che coinvolgono la parte più superficiale del substrato se questo è incoerente. Se risultano abbastanza estese prendono anche il nome di **lanie** (fig. e). Sovente le frane sono di tipo misto, per cui non è sempre facile l'attribuzione all'una o all'altra categoria.



Il tipo di frana è influenzato dal tipo di roccia e dalle caratteristiche del versante: alcune (come le frane di crollo) si compiono in pochi minuti, altre (come le frane di colamento) possono durare mesi o anche anni.

307

Disegno esplicativo

## Glossario con i termini tecnici e iconcetti da ricordare

8 - Rocce ignee

### GLOSSARIO

#### Acido

In petrografia il termine acido fa riferimento alla percentuale di silice presente nelle rocce ignee: si dice acida una roccia in cui il contenuto di silice supera il 66%.

#### Batolite

Massa rocciosa intrusiva di enormi dimensioni, avente per lo più composizione granitica.

#### Cristallizzazione

Processo di formazione dei cristalli per raffreddamento di un magma, oppure per trasformazione allo stato solido di minerali preesistenti.

#### Cristallizzazione frazionata

Processo di cristallizzazione dei minerali all'interno di un magma, secondo una precisa sequenza, in base alla loro temperatura di fusione: cristallizzano per primi i minerali che possiedono temperatura di fusione più elevata.

#### Fenocristalli

Cristalli ben visibili a occhio nudo, presenti nelle rocce ignee effusive a struttura porfirica, dove sono circondati da una pasta di fondo microcristallina.

#### Filone

Massa intrusiva tabulare, situata entro fenditure della roccia incassante.

#### Magma

Massa fusa silicatica, contenente gas, generata all'interno della Terra e con temperature comprese tra 800 °C e 1300 °C.

#### Olocristallina

Struttura tipica delle rocce ignee intrusive, caratterizzata da cristalli tutti ben visibili a occhio nudo.

#### Plutone

Massa rocciosa di considerevoli dimensioni, originata per intrusione in profondità di un magma successivamente raffreddato e solidificato.

### TEST DI VERIFICA

#### 1 Un magma è definito acido quando:

- a) è molto ricco in silice;
- b) è molto ricco in silice e quindi molto fluido;
- c) è molto ricco in silice e quindi molto viscoso;
- d) se sciolto in acqua, dà una reazione neutra.

#### 2 Le rocce ignee possiedono una struttura olocristallina quando:

- a) il raffreddamento è stato assai brusco;
- b) non possiede cristalli visibili a occhio nudo;
- c) il raffreddamento è avvenuto gradualmente.

#### 3

L'ossidiana è una roccia vetrosa

perché:

- a) il raffreddamento è stato assai brusco;
- b) non possiedono cristalli visibili a occhio nudo;
- c) il raffreddamento è avvenuto gradualmente.

#### 4 Collocato nelle categorie rocce plutoniche (P) e vulcaniche (V) i termini tra quelli elencati:

- ☐ hanno cristalli regolari;
- ☐ sono vetrose;
- ☐ derivano dal consolidamento di colate laviche;
- ☐ hanno tessitura plocristallina;
- ☐ si consolidano lentamente;
- ☐ sono microcristalline.

114

Risposte

Test di autoverifica della preparazione

**e schemi riassuntivi aiutano la piena comprensione del testo e la ricapitolazione della materia. I capitoli sono conclusi da glossari dei termini tecnici e dei concetti da ricordare. I test di verifica consentono, mediante il confronto delle risposte al loro piede, di controllare autonomamente il proprio livello di preparazione. Numerosi riquadri di approfondimento trattano temi particolari e forniscono notizie aggiuntive per integrare gli argomenti della trattazione principale e allargarne il margine di comprensione.**

# Indice

---

Che cosa sono le scienze della Terra	9	<b>7 Materiali della crosta terrestre</b>	94
<b>1 Astronomia fondamentale</b>	12	7.1 Sostanze, elementi e composti	94
1.1 I riferimenti sulla sfera celeste	12	7.2 I minerali	97
1.2 Le coordinate celesti	15	7.3 Classificazione dei minerali	101
1.3 Strumenti di osservazione	17	7.4 La formazione dei minerali	104
1.4 Il tempo in astronomia	19	7.5 Le rocce	105
<b>2 Le stelle</b>	22	<b>8 Rocce ignee</b>	108
2.1 La struttura stellare	22	8.1 Genesi delle rocce ignee	108
2.2 La distanza delle stelle	25	8.2 Struttura delle rocce ignee	109
2.3 Il moto delle stelle	26	8.3 Composizione chimica delle rocce ignee	111
2.4 L'evoluzione stellare	26	8.4 Le principali famiglie di rocce ignee	112
2.5 Tipi di stelle	29	<b>9 Rocce sedimentarie</b>	115
2.6 Le costellazioni	32	9.1 Classificazione delle rocce sedimentarie	115
<b>3 Il sistema solare</b>	34	9.2 Il processo sedimentario	120
3.1 Origine del sistema solare	34	9.3 La stratificazione delle rocce sedimentarie	123
3.2 Il Sole	36	<b>10 Rocce metamorfiche</b>	126
3.3 I pianeti	38	10.1 Il metamorfismo	126
3.4 La Luna	45	10.2 Tipi di metamorfismo	128
<b>4 L'origine dell'universo</b>	55	10.3 L'anatessi	129
4.1 Le galassie	55	10.4 La struttura delle rocce metamorfiche	129
4.2 Origine ed evoluzione dell'universo	58	<b>11 L'interno della Terra</b>	132
<b>5 Il pianeta Terra</b>	62	11.1 Lo studio dell'interno della Terra	132
5.1 La forma della Terra	62	11.2 La struttura interna della Terra	135
5.2 Le dimensioni della Terra	63	11.3 Litosfera, astenosfera e mesosfera	138
5.3 L'orientamento	65	11.4 Il campo gravitazionale terrestre	140
5.4 I riferimenti sulla superficie terrestre	66	11.5 Il calore terrestre	141
5.5 I movimenti terrestri	68	11.6 Il campo magnetico terrestre	142
5.6 Conseguenze dei moti della Terra	72		
<b>6 La rappresentazione cartografica della superficie terrestre</b>	78		
6.1 Le carte geografiche	78		
6.2 Classificazione delle carte geografiche	82		
6.3 Le proiezioni geografiche	85		
6.4 Come si costruisce una carta geografica	90		

<b>12 Le teorie tettoniche</b>	146	16.4 Metodi di datazione assoluta	192
12.1 La deriva dei continenti	146	16.5 Le ere geologiche	195
12.2 L'esplorazione dei fondali oceanici	148	<b>17 Atmosfera</b>	205
12.2 La teoria della tettonica a placche	149	17.1 La composizione chimica dell'atmosfera	205
12.3 I margini delle placche	151	17.2 Origine ed evoluzione dell'atmosfera	207
12.4 La causa del movimento delle placche	155	17.3 La suddivisione dell'atmosfera	208
<b>13 Le deformazioni tettoniche della litosfera</b>	158	17.4 La temperatura dell'aria nella troposfera	211
13.1 Le strutture tettoniche	158	17.5 La pressione atmosferica	214
13.2 Le faglie	159	17.6 L'umidità atmosferica	215
13.3 Le pieghe	162	17.7 I venti	216
13.4 Strutture tettoniche a scala locale e a scala regionale	163	17.8 La circolazione generale dell'aria nell'atmosfera	219
<b>14 Il vulcanismo</b>	166	17.9 Le nubi e la nebbia	224
14.1 L'attività vulcanica	166	17.10 Le precipitazioni	226
14.2 La struttura di un vulcano	167	17.11 Le perturbazioni atmosferiche	227
14.3 I materiali emessi da un vulcano	169	17.12 El Niño	230
14.4 Le fasi di un'eruzione	171	17.13 Le previsioni del tempo	230
14.5 I tipi di vulcano	172	<b>18 I climi</b>	234
14.6 Il vulcanismo secondario	174	18.1 Il tempo e il clima	234
14.7 La distribuzione geografica dell'attività vulcanica	175	18.2 Elementi e fattori del clima	235
<b>15 La sismicità</b>	178	18.3 La classificazione dei climi	236
15.1 La natura e l'origine di un terremoto	178	18.4 I climi megatermici umidi	238
15.2 La classificazione dei terremoti	179	18.5 I climi aridi	239
15.3 Le onde sismiche	180	18.6 I climi mesotermici	240
15.4 La registrazione dei terremoti	182	18.7 I climi microtermici	241
15.5 L'intensità dei terremoti	183	18.8 I climi nivali	242
15.6 Distribuzione geografica dei terremoti	185	18.9 Il clima in Italia	242
<b>16 La storia della Terra</b>	188	<b>19 Idrosfera: le acque marine</b>	246
16.1 Il tempo geologico	188	19.1 Oceani e mari	246
16.2 I fossili	189	19.2 Le caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua di mare	247
16.3 Metodi di datazione relativa	191	19.3 Le variazioni di livello dei mari	249
		19.4 Le correnti marine	250
		19.5 Le onde	253
		19.6 La morfologia dei fondali oceanici	254



<b>20</b>	<b>Idrosfera:</b>	
	<b>le acque continentali</b>	257
20.1	Il ciclo dell'acqua	257
20.2	Le acque superficiali: i fiumi	259
20.3	Le acque superficiali: i laghi	264
20.4	I ghiacciai	265
20.5	Le acque sotterranee: le falde e le sorgenti	270
<b>21</b>	<b>Il modellamento della superficie terrestre</b>	274
21.1	Gli agenti geomorfologici	274
21.2	L'azione geomorfologica dell'atmosfera	275
21.3	Il carsismo	278
21.4	L'azione geomorfologica del vento	281
21.5	L'azione geomorfologica dei fiumi	283
21.6	L'azione geomorfologica dei ghiacciai	286
21.7	L'azione geomorfologica dei mari	289
<b>22</b>	<b>Il suolo</b>	293
22.1	La genesi dei suoli	293
22.2	La composizione dei suoli	295
22.3	Il profilo dei suoli	297
22.4	Alcune caratteristiche dei suoli	298
<b>23</b>	<b>L'uomo e il rischio naturale</b>	303
23.1	Il rischio sismico	303
23.2	Il rischio vulcanico	303
23.3	Il dissesto idrogeologico	305
23.4	Le valanghe	308
23.5	La desertificazione	309
<b>24</b>	<b>Le risorse minerarie</b>	313
24.1	I giacimenti minerali	313
24.2	Genesi e classificazione dei giacimenti	314
24.3	L'esaurimento delle risorse minerarie	317

# Che cosa sono le scienze della Terra

---

L'espressione "scienze della Terra" è stata coniata di recente: fino a qualche anno fa, le varie discipline scientifiche che rientrano sotto questa comune denominazione (tra cui astronomia, geografia fisica, geologia) venivano definite "scienze naturali" (tale espressione comprendeva anche la biologia, la zoologia, la botanica ecc., discipline che studiano gli esseri viventi).

**Le scienze della Terra raggruppano oggi una serie di settori disciplinari rivolti allo studio di corpi materiali non viventi** (masse d'aria, corpi idrici, ammassi rocciosi) **e all'osservazione di fenomeni naturali** (meteorologici, sismici, vulcanici, geomorfologici, idrologici, oceanografici ecc.). La nascita, abbastanza recente, di una sensibilità, oltre che di un interesse "ecologico" generalizzato, ha introdotto nell'ambito delle scienze della Terra **indirizzi di studio incentrati sull'ambiente**, inteso come sede delle risorse dell'uomo, ma anche come "bene collettivo" soggetto a vari "impatti" negativi: inquinamento, erosione, desertificazione, rischi sismici ecc. In definitiva, le scienze della Terra assommano tutte le discipline teoriche "classiche" e quelle sviluppatesi con funzione applicativa, cioè in grado di fornire strumenti utili per le attività umane (per esempio, la geologia ambientale o la geologia applicata), che si dedicano allo studio del nostro pianeta (tab. 1).

Se all'inizio la ricerca si è dedicata allo studio del particolare, oggi si tende a ricostruire i **"sistemi ambientali"**, unendo e correlando le varie informazioni. Attualmente si tende a considerare e a interpretare i fenomeni di varia natura che interessano la superficie terrestre in una prospettiva unitaria, che guarda alla Terra, o meglio al **"sistema Terra"**, come a un **insieme di "sistemi ambientali" interagenti**, al cui studio concorrono le conoscenze provenienti dai differenti ambiti di ricerca, secondo un'impostazione interdisciplinare. Secondo il modello più generale, il sistema Terra viene distinto in alcuni grandi sistemi ambientali o "domini": la geosfera, l'idrosfera e l'atmosfera.

La **geosfera** è costituita dalla Terra solida, a partire dal suo nucleo fino alla crosta terrestre; l'**idrosfera** è il dominio dell'acqua, sia quella presente sulla superficie (oceani, mari, la-

I settori disciplinari

Il "sistema Terra"

Geosfera, idrosfera, atmosfera

## Biosfera

ghi, fiumi, ghiacciai), sia quella ipogea (falde acquifere), sia il vapore acqueo atmosferico; l'**atmosfera** è l'involucro gassoso che circonda il pianeta. Geosfera, idrosfera e atmosfera interagiscono attraverso scambi di energia e di materia. Il quadro, tuttavia, si completa considerando un quarto sistema ambientale: quello dove ha sede la vita, denominato **biosfera**, o **ecosfera**, che permea gli altri tre componenti del sistema Terra e interagisce con essi. Lo spazio nel quale si svolge la vita interessa la parte superficiale della geosfera (litosfera) emergente dalle acque (terre emerse), l'idrosfera e lo strato più basso dell'atmosfera (troposfera).

**Tabella 1** Settori disciplinari delle scienze della Terra

DISCIPLINE A CARATTERE SCIENTIFICO	OGGETTO DI STUDIO
<b>climatologia</b>	caratteristiche dei fenomeni climatici
<b>cristallografia</b>	forma e struttura dei cristalli
<b>geocronologia</b>	datazione dei vari tipi di rocce e dei fenomeni geologici
<b>geochimica</b>	composizione chimica dei corpi geologici terrestri
<b>geofisica</b> <i>fisica terrestre</i>	campi di forze associati alla Terra (magnetico, gravitazionale)
<b>geografia fisica</b>	fenomeni naturali dell'atmosfera e dell'idrosfera; fenomeni legati ai climi; loro rapporti ed effetti sulla superficie terrestre
<b>geologia</b>	comprende i campi della stratigrafia, della tettonica della sedimentologia e della geocronologia
<b>geologia storica</b>	storia degli eventi geologici
<b>geomorfologia</b>	forme del paesaggio, loro genesi ed evoluzione
<b>geopedologia</b>	suoli e loro genesi
<b>glaciologia</b>	fenomeni naturali in cui sono coinvolti i ghiacciai
<b>idrografia</b>	distribuzione delle acque superficiali
<b>limnologia</b>	fenomeni lacustri
<b>mineralogia</b>	costituzione fisica e chimica dei minerali
<b>oceanografia</b>	fenomeni che hanno luogo negli oceani e nei mari
<b>paleontologia</b>	fossili di animali e di vegetali
<b>petrografia</b> <i>petrologia</i>	genesì e caratteristiche delle rocce ignee, metamorfiche e sedimentarie; ambienti di sedimentazione
<b>sismologia</b>	terremoti
<b>stratigrafia</b>	rapporti cronologici tra gli eventi sedimentari
<b>tettonica</b>	strutture acquisite dalle masse rocciose in seguito a fenomeni deformativi
<b>vulcanologia</b>	fenomeni vulcanici

**Tabella 1** Settori disciplinari delle scienze della Terra

DISCIPLINE A CARATTERE APPLICATIVO	OGGETTO DI STUDIO
<b>geologia agraria</b>	geopedologia applicata; tecnica delle irrigazioni
<b>geologia ambientale</b>	aspetti di carattere geologico della realtà ambientale
<b>geologia degli idrocarburi</b>	giacimenti petroliferi
<b>geologia delle costruzioni</b>	condizioni di realizzazione delle opere ingegneristiche
<b>geomorfologia applicata</b>	difesa dei versanti e delle coste; difesa dai rischi naturali
<b>geotecnica</b>	proprietà fisiche delle rocce
<b>geotermia</b>	fluidi caldi provenienti dal sottosuolo
<b>giacimentologia</b>	giacimenti minerari e cave
<b>idrogeologia</b>	ricerche d'acqua (potabile, minerale, termale)
<b>meccanica delle rocce</b>	proprietà fisiche delle masse rocciose
<b>meteorologia</b>	fenomeni atmosferici e previsioni del tempo
<b>petrografia applicata</b>	proprietà delle pietre da costruzione e dei materiali naturali utilizzati nell'edilizia e nel restauro di opere d'arte

# 1 Astronomia fondamentale

Osservando il cielo di notte, le stelle sembrano essere “fisse”, cioè come “incastonate” tutte alla stessa distanza dalla Terra su un immenso emisfero (**sfera celeste**), dotato di movimento apparente da est verso ovest. Per stabilire la posizione degli astri sulla sfera celeste sono stati concepiti vari **sistemi di coordinate**, costruiti sulla base di punti caratteristici e piani convenzionali. Da tali osservazioni, realizzate utilizzando **strumenti astronomici** sempre più raffinati, si sono evoluti sia la **misura del tempo**, sia le modalità della sua misurazione.

## 1.1 I riferimenti sulla sfera celeste

La sfera celeste

La **sfera celeste**, o volta celeste, può essere considerata come una **sfera di raggio infinito con centro in corrispondenza dell'osservatore** stesso, che si suppone collocato al centro della Terra (la sfera celeste si può considerare un ingrandimento immensamente esteso della sfera terrestre, perciò l'equatore celeste si trova al medesimo piano dell'equatore terrestre e l'asse della sfera celeste, detto asse del mondo, si trova sul prolungamento dell'asse di rotazione terrestre). Per studiare il moto dei corpi celesti, occorre fissare sulla sfera celeste dei riferimenti per stabilire sistemi di coordinate astronomiche (v. par. 1.2).

Di seguito vengono descritti i principali riferimenti sulla sfera celeste (si rammenta che, tagliando una sfera con piani passanti per il suo centro si individuano, nei punti di intersezione sulla superficie della sfera, circonferenze dette cerchi massimi).

Poli celesti

**Polo Nord e polo Sud celesti:** sono i punti di intersezione con la sfera celeste della retta che si ottiene prolungando nelle direzioni opposte l'asse di rotazione terrestre.

Equatore celeste

**Equatore celeste:** cerchio massimo equidistante in ogni punto dai poli celesti, che divide la sfera celeste in due emisferi, settentrionale (boreale) e meridionale (australe); esso si trova nel medesimo piano in cui giace l'equatore terrestre.

Paralleli e meridiani celesti

**Paralleli celesti:** cerchi tracciati sulla sfera celeste parallelamente all'equatore celeste e di diametro decrescente procedendo verso i poli celesti.

**Meridiani celesti:** cerchi massimi sulla sfera celeste, detti **cerchi orari** (a ogni ora ciascuno di essi passa davanti a un osservatore), passanti per i poli celesti e perpendicolari all'equatore celeste.

**Eclittica:** circolo massimo che il Sole sembra descrivere sulla sfera celeste durante il suo cammino annuale apparente (eclittica è anche chiamata l'orbita descritta dalla Terra nel suo moto di rivoluzione intorno al Sole); l'eclittica è inclinata di circa  $23^\circ$  rispetto all'equatore celeste e taglia quest'ultimo in due punti, detti **punti equinoziali**, o equinozi (nodi dell'eclittica). Il Sole passa rispettivamente per i punti equinoziali e solstiziali, attraversando l'equatore celeste in corrispondenza dell'equinozio primaverile e autunnale. Il punto dell'equinozio di primavera è detto **punto gamma**, o primo punto d'Ariete. Il meridiano celeste passante per i punti equinoziali è detto **coluro equinoziale**. A  $90^\circ$  di distanza angolare dai punti equinoziali sull'eclittica si trovano i **punti solstiziali**.

**Orizzonte celeste (orizzonte astronomico):** intersezione con la sfera celeste del piano passante per il centro della Terra e perpendicolare alla verticale innalzata rispetto all'osservatore terrestre.

**Zenit:** punto in cui la verticale innalzata dalla posizione in cui si trova l'osservatore terrestre incontra la sfera celeste.

**Nadir:** è il punto diametralmente opposto allo zenit.

**Cerchi verticali:** circoli massimi passanti per lo zenit e il nadir perpendicolari al piano dell'orizzonte celeste; il cerchio verticale passante anche per i poli celesti è detto **cerchio meridiano** (o meridiano celeste); il cerchio verticale perpendicolare al cerchio meridiano (detto **primo cerchio verticale**) taglia l'orizzonte celeste in due punti corrispondenti all'Est e all'Ovest (fig. 1.1).

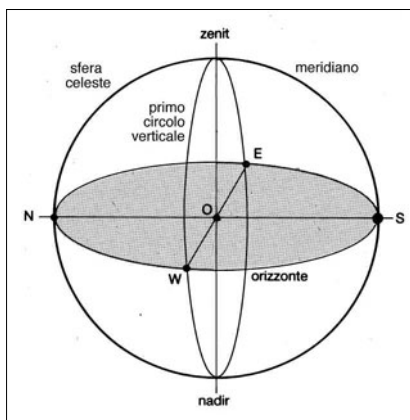
Eclittica

Punti equinoziali

Orizzonte celeste

Zenit e nadir

Cerchi verticali



**Figura 1.1**  
Cerchio meridiano e  
primo cerchio verticale.

## 1.2 Le coordinate celesti

L'astronomia  
di posizione

L'**astronomia di posizione** considera solo le direzioni relative degli astri e le distanze apparenti tra questi, che vengono espresse in termini di angoli. Per fissare la posizione degli oggetti celesti si fa uso di **sistemi di coordinate sferiche**. La determinazione è semplificata, se supponiamo che l'osservatore si trovi al centro della sfera stessa. I sistemi di coordinate astronomiche hanno tutti un piano di riferimento passante per il centro della sfera celeste e due punti sulla sfera celeste: i due poli del piano scelto. La posizione di un punto è individuata da due coordinate: l'ascissa sferica e l'ordinata sferica. I sistemi di coordinate sono: il **sistema altazimutale**, il **primo sistema equatoriale** (o **sistema orario**) e il **secondo sistema equatoriale** (trattati di seguito), il **sistema di coordinate eclittiche** e il **sistema di coordinate galattiche** (descritti nel riquadro).

### ■ Il sistema orizzontale (altazimutale)

Nel sistema altazimutale (fig. 1.2) il **circolo di riferimento** è l'**orizzonte visivo** dell'osservatore (cioè la linea dell'orizzonte terrestre) e le due coordinate, che permettono di definire la posizione angolare degli astri, sono l'altezza e l'azimut. L'**altezza** è l'arco di circolo verticale (misurato in gradi, primi e secondi d'arco) compreso fra l'astro e l'orizzonte. Varia

Altezza

### SISTEMI DI COORDINATE ECLITTICHE E DI COORDINATE GALATTICHE

Il sistema di coordinate eclittiche usa come circolo massimo di riferimento l'**eclittica**, sul cui piano si muove la maggior parte dei corpi del sistema solare. Le coordinate sono la **latitudine** e la **longitudine eclittica**.

La **latitudine eclittica** ( $\beta$ ) è l'ampiezza dell'arco di circolo massimo (circolo di longitudine) compreso fra l'astro e la sua proiezione sull'eclittica. È misurata in gradi tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  N nell'emisfero che contiene il polo Nord celeste e tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  S nell'emisfero che comprende il polo Sud.

$$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$$

La **longitudine** ( $\lambda$ ) è l'arco di eclittica compreso tra il punto  $\gamma$  e il punto in cui il circolo di longitudine passante per l'astro taglia l'eclittica. È misurata in gradi tra  $0^\circ$  e

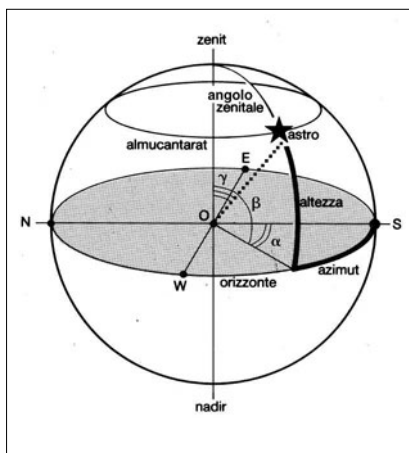
$360^\circ$  in direzione est, in senso congruente con l'ascensione retta. Poiché la maggior parte dei pianeti si muove in prossimità del piano dell'eclittica, questo sistema è adatto alla trattazione di problemi legati al moto planetario.

$$0^\circ \leq \lambda \leq 360^\circ$$

Il sistema di coordinate galattiche ha come riferimento il piano dell'**equatore galattico**; le coordinate sono la **latitudine** e la **longitudine galattica**, definite analogamente alla latitudine e longitudine celeste.

Le longitudini galattiche hanno origine nel punto in cui dal sistema solare vediamo proiettato il centro galattico (nella costellazione del Sagittario). L'arco tra equatore galattico ed equatore celeste è pari a  $62^\circ$ .

**Figura 1.2**  
Sistema di coordinate  
orizzontali.



da  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , valore che assume quando l'astro è sulla verticale dell'osservatore, cioè allo zenit:

$$0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$$

Il complemento all'altezza è detto angolo zenitale ed è la distanza angolare tra astro e zenit ( $\gamma$ ).

L'**azimut** è definito come l'arco di orizzonte compreso tra il punto Sud e il punto in cui il cerchio verticale passante per l'astro incontra l'orizzonte. L'azimut si misura dal punto Sud verso ovest e varia da  $0^\circ$  a  $360^\circ$ .

$$0^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$$

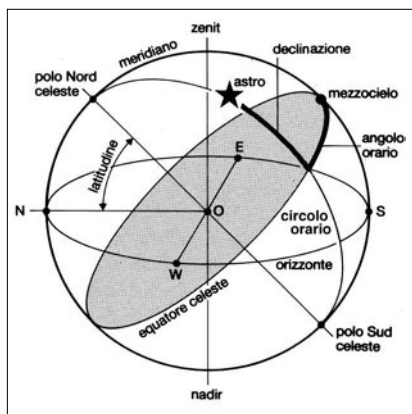
Il vantaggio di questo sistema è che si ottengono immediatamente le coordinate di un astro rispetto a un osservatore, in quanto queste sono riferite semplicemente al suo orizzonte e alla sua verticale. Ha però l'inconveniente che, per un osservatore non posto al polo, in conseguenza dell'apparente rotazione diurna della sfera celeste, i valori delle coordinate di uno stesso oggetto variano con la posizione geografica e, per effetto della rotazione della sfera celeste, anche con l'ora di osservazione. Per ovviare a questo inconveniente, si fa uso dei sistemi di coordinate equatoriali, per i quali una sola (primo sistema) o entrambe (secondo sistema) le coordinate sono indipendenti dal tempo.

Vantaggi  
e inconvenienti  
del sistema

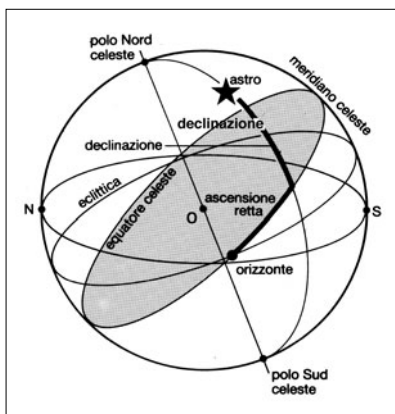
### ■ Primo sistema di coordinate equatoriali

Questo sistema di coordinate assume come cerchio massi-





**Figura 1.3**  
Primo sistema di coordinate equatoriali (sistema orario).



**Figura 1.4**  
Secondo sistema di coordinate equatoriali.

mo di riferimento l'**equatore celeste** (fig. 1.3). Le due coordinate sono la declinazione e l'angolo orario. Il cerchio orario passante per l'astro in oggetto è detto cerchio di declinazione. La **declinazione** di un astro è l'arco di cerchio di declinazione che costituisce la distanza angolare dell'astro dall'equatore celeste. Si misura in gradi (da  $0^\circ$  a  $90^\circ$  N nell'emisfero boreale e da  $0^\circ$  a  $90^\circ$  S in quello australe):

$$0^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$$

Angolo orario

L'**angolo orario** ( $H$ ) è la distanza angolare tra il mezzocielo (punto sull'equatore celeste determinato dall'intersezione del meridiano dell'osservatore passante per i punti zenit e Sud) e il meridiano dell'oggetto celeste:

$$0h \leq H \leq 24h$$

Si misura in ore (h), minuti (min) e secondi (s) con origine nel **mezzocielo** andando verso ovest. In questo sistema la declinazione resta costante, ma, per la rotazione apparente della sfera celeste, l'angolo orario assume tutti i valori tra 0 e 24 ore nell'arco di un giorno. Esso varia inoltre da punto a punto.

### ■ Secondo sistema di coordinate equatoriali

Usa come cerchio massimo di riferimento l'**equatore celeste** e si basa sulle coordinate celesti declinazione (vista nel caso precedente) e ascensione retta (fig. 1.4).

L'**ascensione retta** ( $AR$ ) è la distanza angolare tra il meridiano che passa per l'astro e il meridiano che passa per il primo punto di Ariete. Si misura in ore, minuti e secondi da 0

Ascensione retta

a 24 ore in direzione est (senso antiorario), cioè in verso contrario a quello dell'angolo orario.

$$0h \leq AR \leq 24h$$

**Le coordinate definite da questo sistema sono quelle riportate nei cataloghi stellari**, negli atlanti celesti, negli annuari, in quanto indipendenti dal luogo e dall'ora di osservazione. Anche per questo sistema esiste, però, una dipendenza dal tempo, dovuta al moto proprio delle stelle e allo spostamento lento ma graduale dell'origine delle coordinate, cioè del punto  $\gamma$ , per effetto del moto di precessione dell'asse terrestre (v. a pp. 68-69).

### ■ Il moto diurno

Per effetto della rotazione della Terra attorno al suo asse, la sfera celeste descrive una **rotazione apparente** alla quale è dovuto il sorgere e il tramontare del Sole, delle stelle e degli altri corpi celesti. **Nel tempo di un giorno, gli astri**, in rotazione apparente da est a ovest, **incontrano due volte il meridiano celeste**. In un incontro, la loro altezza sull'orizzonte è massima e si ha una culminazione superiore; nell'altro è minima e si ha una culminazione inferiore. **All'equatore i poli celesti si trovano all'orizzonte**; tutte le stelle restano al di sopra dell'orizzonte per metà di un giorno e tramontano e sorgono muovendosi perpendicolarmente all'orizzonte. **Ai poli, invece, l'equatore celeste coincide con l'orizzonte** e tutte le stelle si muovono in traiettorie circolari senza mai sorgere né tramontare. Nessuna stella dell'altro emisfero può essere mai osservata. A latitudini intermedie si hanno situazioni intermedie. Solo un certo gruppo di stelle, quelle circumpolari, la cui distanza dal polo è minore della latitudine dell'osservatore, non tramontano mai e di esse si può osservare sia la culminazione superiore, sia la culminazione inferiore.

La rotazione  
apparente

## 1.3 Strumenti di osservazione

Fino all'inizio del XVII secolo, le osservazioni del cielo venivano compiute a **occhio nudo**. Le osservazioni astronomiche si limitavano a cercare di conoscere con la maggior precisione possibile le posizioni dei corpi celesti. L'occhio permette di stimare la distanza di oggetti vicini, ma l'osservazione si complica quando si vogliono osservare stelle o pianeti.

Le potenzialità dell'occhio aumentarono in modo modesto quando, nel 1609, Galileo Galilei (1564-1642) mise a punto un **cannocchiale**, precursore del telescopio astronomico.

Il cannocchiale

Egli riuscì tuttavia a osservare particolari fino ad allora sconosciuti, quali il rilievo lunare, le macchie solari, le fasi di Venere, i quattro maggiori satelliti di Giove; scoprì, inoltre, che la Via Lattea è formata da numerosissime stelle.

## ■ I telescopi

In un **telescopio** (dal greco *têle*, lontano, e *scopéo*, guardare) un telescopio, un dispositivo ottico, l'obiettivo, raccoglie la luce degli oggetti celesti e la focalizza in un punto, costruendone così l'immagine; questa viene osservata attraverso l'oculare, oppure viene raccolta su una lastra fotografica o un dispositivo elettronico. Vi sono due categorie di telescopi, in funzione del tipo di obiettivo: rifrattori e riflettori.

Telescopio rifrattore

Nel **telescopio rifrattore**, strutturalmente simile a quello usato per la prima volta da Galilei, l'obiettivo è costituito da due lenti (uno svantaggio è che non si possono utilizzare lenti con diametro molto grande).

Telescopio riflettore

Nel **telescopio riflettore**, inventato da Newton (1642-1727) come obiettivo si usa uno specchio concavo (meno costoso, perché più facilmente realizzabile) e i raggi luminosi da esso riflessi vengono raccolti da uno specchio secondario, che li invia all'oculare o agli strumenti di analisi della luce. La nostra pupilla ha un diametro di pochi millimetri e raccoglie una quantità di energia molto limitata. Grandi specchi sono in grado di catturare una quantità di energia enormemente maggiore e ciò consente l'individuazione di oggetti celesti che, a causa della loro grande distanza, non sarebbero individuati (per esempio, il telescopio di Monte Palomar, negli Stati Uniti, può osservare la luce di stelle un milione di volte più deboli di quelle osservabili a occhio nudo).

Ingrandimento,  
potere risolutivo  
e luminosità

L'**ingrandimento** di un telescopio cresce con la distanza focale dell'obiettivo; le stelle, tuttavia, appaiono sempre come oggetti puntiformi. L'ingrandimento è una proprietà che entra in gioco quando si osservano sorgenti estese (pianeti). All'astronomo interessa poter "separare" due stelle molto vicine tra loro. Questa caratteristica, detta **potere risolutivo** del telescopio, dipende dal diametro dell'obiettivo e cresce con le sue dimensioni. La terza qualità è la **luminosità**, cioè la capacità di scorgere oggetti molto deboli, che aumenta al crescere del diametro dell'obiettivo.

Radiotelescopi

Oltre che nella banda della luce visibile, il cosmo ci invia messaggi su tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico (raggi gamma, X, ultravioletti, infrarossi, onde radio ecc.). Oggi un ruolo importantissimo in astronomia, astrofisica e cosmologia è svolto dall'osservazione nei raggi X e gamma e dall'uso dei **radiotelescopi**, che appaiono come gigantesche

antenne di forma parabolica che raccolgono le onde radio emesse dai corpi celesti e le indirizzano su un ricevitore, e il segnale ricevuto viene amplificato e analizzato. Se con i telescopi si arriva a distanza di qualche miliardo di anni luce, i radiotelescopi estendono questa capacità oltre 10 miliardi di anni luce. La radioastronomia ha permesso la scoperta di oggetti celesti come quasar e pulsar (v. a p. 33 e a p. 31).

### ■ Effetti dell'atmosfera sulle osservazioni astronomiche

L'osservazione di un astro con un telescopio da Terra è soggetta a perturbazioni da parte dell'atmosfera terrestre.

L'atmosfera produce una deviazione angolare progressiva dei raggi luminosi provenienti da una sorgente celeste. È come se la traiettoria della luce fosse curva (ne risulta che l'osservatore vede l'astro a un'altezza maggiore di quella reale).

La rifrazione  
atmosferaica

Quando un raggio di luce attraversa l'atmosfera terrestre, viene parzialmente assorbito dalla massa d'aria in cui transita. Tale fenomeno è tanto più accentuato quanto più è ampio l'angolo zenitale (angolo fra la linea di zenit e il tragitto del raggio luminoso). La turbolenza atmosferica limita le prestazioni dei grandi strumenti astronomici (l'immagine fluttua irregolarmente, va "fuori fuoco").

L'assorbimento  
atmosferaico

La turbolenza  
atmosferaica

## 1.4 Il tempo in astronomia

In astronomia si considerano due "categorie" di tempo distinte: il **tempo solare**, basato sul moto diurno del Sole, e il **tempo siderale**, basato sul moto diurno della sfera celeste. Il giorno solare è l'intervallo di tempo tra due passaggi successivi del Sole, in corrispondenza del medesimo meridiano; il giorno siderale è l'intervallo tra due passaggi al meridiano di una qualsiasi stella fissa. Le due durate, per effetto del moto terrestre, non coincidono (v. par. 5.5).

Tempo solare  
e tempo sidereo

Si tratta in entrambi i casi di **tempi locali**, in quanto il loro valore, in uno stesso istante, dipende dalla posizione geografica (latitudine e longitudine, v. par. 5.4) dell'osservatore sulla Terra; da tale variabilità è sorta l'esigenza di introdurre i **fusi orari**, 24 zone della Terra in ognuna delle quali vige convenzionalmente lo stesso tempo. Ogni fuso orario adotta l'ora del proprio meridiano centrale, che è in ritardo di un'ora rispetto al meridiano centrale immediatamente a est e in anticipo di un'ora rispetto a quello immediatamente a ovest. Il meridiano iniziale è quello di Greenwich (Londra). I fusi orari hanno in genere linee sinuose per adattarsi ai confini degli Stati nei quali sono adottate le ore corrispondenti.

Tempi locali e fusi  
orari

## Tempo universale

Ai tempi locali si contrappone il **tempo universale** (TU), considerato come tempo locale del meridiano fondamentale, passante per l'osservatorio di Greenwich.

## ■ Calendari

Rappresentano il sistema per raggruppare organicamente lunghi intervalli di tempo determinati attraverso l'osservazione dei fenomeni astronomici. Considerano generalmente l'anno come intervallo di base. A questa periodicità è stata poi sovrapposta la settimana, inizialmente solo con significato religioso, poi con valore civile. Nei diversi calendari sviluppati nel corso della storia dell'umanità si è fatto, e si fa tuttora, ricorso a fenomeni legati al Sole, o alla Luna, o a entrambi gli astri, prendendo come base le suddette periodicità. Si hanno quindi **calendari solari** (come quello gregoriano, v. riquadro), che fanno riferimento al moto apparente del Sole attraverso le costellazioni; **calendari lunari** che fanno riferimento al ripetersi delle fasi lunari e **calendari lunisolari**, che cercano di accordarsi il meglio possibile a entrambe le periodicità. La precisione dei diversi calendari è rappresentata dalla precisione con cui si trovano multipli dei periodi dei fenomeni astronomici interessati. In pratica, tale precisione aumenta aggiungendo periodicamente all'anno o al mese un giorno supplementare. Le regole con cui tale aggiunta viene effettuata sono tanto più complesse quanto maggiore è la precisione che si vuole conseguire.

## Calendari solari e calendari lunari

### CALENDARIO GREGORIANO

È il calendario attualmente in uso nella maggior parte dei paesi industrializzati. Pur essendo un calendario solare, nella divisione in mesi e in altri particolari mantiene tracce di precedenti calendari lunari. Esso trae le sue origini dirette dal primitivo calendario di Roma, modificato con una riforma di Giulio Cesare del 46 a.C. Il calendario riformato, detto calendario giuliano, era di 12 mesi e di 365 giorni per tre anni consecutivi; ogni quattro anni era di 366 giorni. Il giorno supplementare andava aggiunto dopo il 25 febbraio, che era il sesto giorno prima delle calende di marzo (l'inizio del mese). Il giorno aggiunto era dunque il bis-sextus, cioè ripetizione del sesto, da cui il nome di anno bisestile per gli anni di 366 giorni. Nel II secolo venne

usata anche la settimana, di origine ebraica, sovrapposta al ciclo annuale e mensile. L'aggiungere un giorno ogni quattro anni presupponeva che l'anno tropico (intervallo tra due successivi passaggi del Sole al primo punto di Ariete) fosse di 365,25 giorni solari, cioè un po' maggiore di quanto in realtà non sia (365,242). Il sommarsi delle frazioni eccedenti portò a un errore già avvertibile nel 730. Per tener conto della differenza, papa Gregorio XIII promulgò nel 1582 la riforma del calendario, che portò al calendario tuttora adottato. Si fece seguire a giovedì 4 ottobre 1582 il venerdì 15 ottobre e si stabilì che fossero bisestili gli anni divisibili per quattro e che degli anni terminanti con due zeri fossero bisestili solo quelli divisibili per 400.

## GLOSSARIO

**Eclittica**

È il cerchio massimo di intersezione del piano contenente l'orbita terrestre con la sfera celeste e coincide con la traiettoria apparente del Sole sulla sfera celeste descritta nel corso dell'anno.

**Emisfero**

Ciascuna delle due parti in cui l'immaginaria sfera celeste è divisa dal suo equatore. Si distingue un emisfero boreale (nord) e uno australe (sud).

**Mezzocielo**

Punto sull'equatore celeste determinato dall'intersezione del meridiano dell'osservatore passante per i punti zenit-sud-nadir; alle nostre latitudini esso cade cir-

ca a mezza via tra lo zenit e l'orizzonte.

**Rifrazione**

Fenomeno per cui una radiazione, incidendo su un certo corpo trasparente a essa e attraversandolo, viene deviata dalla direzione di incidenza secondo determinate leggi.

**Rotazione apparente**

Moto apparente degli astri dovuto alla rotazione terrestre.

**Sfera celeste**

È una sfera immaginaria, di raggio grandissimo, tale che un osservatore sulla superficie terrestre possa sempre considerarsi nel suo centro. Su di essa si considerano collocati tutti gli astri.

## TEST DI VERIFICA

1

**Il punto gamma:**

- a coincide con il polo nord;
- b è uno dei punti solstiziali;
- c è il punto dell'equinozio di primavera;
- d coincide con il primo punto di Ariete.

2

**Le coordinate del primo sistema equatoriale sono:**

- a latitudine e longitudine;
- b declinazione e angolo orario;
- c altezza e azimut;
- d declinazione e ascensione retta.

3

**Quali, tra questi effetti dell'atmosfera, si ripercuotono sulle osservazioni astronomiche?**

- a rifrazione;
- b turbolenza;
- c assorbimento;
- d tutti gli effetti.

4

**Nell'emisfero settentrionale il punto sulla verticale rispetto al piano dell'orizzonte è detto:**

- a nadir;
- b nodo;
- c punto gamma;
- d zenit.

5

**Il piano equatoriale forma un angolo di 23°27' intersecando il piano contenente:**

- a l'orizzonte;
- b l'orbita terrestre;
- c il circolo massimo;
- d nessuna delle precedenti.

R

1 c, d; 2 b; 3 d; 4 d; 5 b.

# 2 Le stelle

---

A causa delle enormi distanze che le separano dalla Terra, le **stelle** appaiono all'osservatore in posizioni reciproche praticamente immutabili. Nel corso dei secoli, l'uomo con la sua immaginazione ha riconosciuto in particolari allineamenti o raggruppamenti stellari il profilo o la struttura di oggetti, animali e personaggi mitologici e ha dato loro il nome di **costellazioni**.

Lo sviluppo di tecniche astronomiche ha permesso di **classificare le stelle** e di **comprenderne la struttura**: sono sfere di gas incandescente, tenute insieme dalla forza di gravità; risplendono di luce propria, prodotta in seguito a **reazioni di fusione termonucleare**.

Le stelle sono in continua evoluzione: **gli stadi della vita delle stelle sono rappresentati nel diagramma di Hertzsprung-Russell**, in cui compaiono i parametri temperatura e magnitudine (o luminosità).

## 2.1 La struttura stellare

I parametri fondamentali per caratterizzare una stella sono la magnitudine, la temperatura superficiale, il colore, il raggio e la massa.

### ■ La magnitudine stellare

Osservando il cielo a occhio nudo, ci si rende conto che non tutte le stelle appaiono luminose allo stesso modo; ciò permette di classificarle in base alla cosiddetta **magnitudine apparente**.

La scala delle magnitudini stellari fu introdotta dal matematico e astronomo greco Ipparco (150 a.C.), il quale classificò le stelle in 6 categorie, o classi di magnitudine (apparente), ponendo le stelle più luminose nella 1<sup>a</sup> classe (1<sup>a</sup> magnitudine) e quelle appena visibili a occhio nudo nella 6<sup>a</sup> classe. Oggi la magnitudine apparente,  $m$ , di un astro viene misurata con una formula che si accorda con la vecchia classificazione di Ipparco:

$$m_2 - m_1 = -2,5 \log F_2/F_1$$

dove compaiono la differenza fra le magnitudini  $m_1$  e  $m_2$  di due stelle e il logaritmo del rapporto dei due rispettivi flussi luminosi,  $F_1$  e  $F_2$ , che riceviamo.

Quella delle magnitudini apparenti è una scala relativa, che non fa riferimento a unità assolute di energia luminosa: è perciò necessario scegliere come riferimento una stella cam-

Magnitudine  
apparente

pione (per convenzione è stata scelta la Stella Polare, alla quale è assegnata magnitudine apparente uguale a 2).

Grazie all'ausilio di nuovi strumenti astronomici, le classi si sono moltiplicate e per gli oggetti celesti più luminosi, rispetto alla prima classificazione, vengono oggi assegnate magnitudini negative.

Poiché la luminosità di una stella diminuisce proporzionalmente al quadrato della distanza, per poter confrontare tra loro le luminosità effettive di due stelle dovremmo poterle osservare tutte alla medesima distanza. Si definisce **magnitudine assoluta** la magnitudine apparente di una stella se fosse posta alla distanza standard di 32,6 anni luce (10 par-sec) (tab. 2.1).

Magnitudine  
assoluta

La magnitudine apparente viene misurata attraverso un dispositivo detto fotometro, o tramite l'annerimento di una lastra fotografica esposta per un dato tempo. Misurata la magnitudine apparente, conoscendo la distanza della stella si può, con una semplice formula, risalire alla magnitudine assoluta, oppure, conoscendo la magnitudine assoluta, si può calcolare la distanza.

## ■ Il colore e la temperatura

Le stelle mostrano colori diversi l'una dall'altra; nella costellazione di Orione, per esempio, Betelgeuse è rossa, mentre Rigel è bianco-azzurra. Questo fenomeno è spiegato dalla **legge di Wien**, secondo la quale la lunghezza d'onda, cioè il colore, della luce emessa da un corpo dipende dalla temperatura del corpo stesso. All'aumentare della temperatura di un corpo, diminuisce la lunghezza d'onda delle radiazioni luminose che esso emette in prevalenza e si passa perciò dal rosso al blu. Una stella che emette luce rossa (lunghezza d'onda maggiore) è più fredda rispetto a una stella che emette luce blu.

Legge di Wien

Tutti questi dati ci sono forniti dalla **spettroscopia stellare** (v. riquadro a p. 24). Attraverso l'analisi degli spettri di 225 000 stelle si è giunti a formulare una classificazione secondo dieci **tipi**, o **classi, spettrali** (che inizialmente erano sette), ordinati in funzione della temperatura superficiale decrescente e distinti con lettere dell'alfabeto: O, B, A, F, G, K, M. Le varie classi sono suddivise in sottoclassi, indicate da numeri (2, 8, 0); per esempio, il Sole è una stella di classe spettrale G2.

Tipi, o classi,  
spettrali

I corpi con temperature inferiori ai 3500 °C emettono radiazioni nella banda del rosso (M); verso i 6000 °C la radiazione è giallastra (F, G), mentre stelle con temperature superiori ai 25 000 °C producono una luce bianco-azzurra (O).



**Tabella 2.1** Corrispondenze fra le diverse unità di misura delle distanze adottate in astronomia

UNITÀ DI MISURA	km	UA	al	pc
<b>unità astronomica (UA)</b>	149 600 600	1	$15,8 \times 10^{-6}$	$4,8 \times 10^{-6}$
<b>anno luce (al)</b>	$9463 \times 10^9$	$63 \times 10^3$	1	0,31
<b>parsec (pc)</b>	$30\,900 \times 10^9$	206 265	3,26	1

### ■ La massa e il raggio

La misura  
della massa

Le masse stellari non possono essere misurate direttamente, ma possono essere calcolate misurando gli effetti gravitazionali che una stella produce su un'altra, con la quale costituisce un **sistema binario**, formato cioè da due stelle che ruotano intorno al comune baricentro per effetto di una mutua attrazione gravitazionale (analogamente al sistema Terra-Luna). Per riuscire a stimare la massa anche per altre stelle, si ricorre alla relazione statistica tra massa e luminosità dedotta dal fisico e astronomo inglese A. Eddington (1924).

Il raggio

**Il raggio di una stella è una grandezza molto difficile da misurare.** Solo per il Sole l'osservazione fornisce direttamente il diametro angolare ( $32''$ ); tutte le altre stelle appaiono come punti luminosi (infatti, le loro dimensioni sono inferiori alla risoluzione angolare dei telescopi da Terra).

## LA SPETTROSCOPIA STELLARE

Attraverso le loro radiazioni, le stelle ci inviano messaggi. La **spettroscopia** si occupa delle proprietà della luce che dipendono dalla sua lunghezza d'onda. Una radiazione luminosa viene analizzata mediante uno strumento detto spettroscopio, che la scompone nelle sue lunghezze d'onda componenti, corrispondenti ai vari colori; si ottiene così uno spettro il quale ci permette di descrivere la distribuzione energetica tra le varie lunghezze d'onda presenti, da quelle più lunghe (bassa energia) a quelle più corte (alta energia). I primi studi sistematici sullo spettro solare furono compiuti agli inizi del 1800 dal fisico tedesco J. Fraunhofer (1787-1826). Nel 1859 G. Kirchhoff (1824-87) formulò le **tre leggi della spettroscopia**:

- un solido, un liquido o un gas molto den-

so, portati all'incandescenza, presentano uno spettro di emissione continuo, cioè emettono radiazioni a tutte le lunghezze d'onda (prima legge);

- un gas rarefatto incandescente possiede uno spettro di emissione a righe, ossia emette radiazioni soltanto a certe lunghezze d'onda, caratteristiche degli elementi o dei composti chimici presenti nel gas (seconda legge);

- un gas rarefatto, posto di fronte a una sorgente di radiazione continua avente temperatura più elevata, dà origine a uno spettro di assorbimento a righe, alle stesse lunghezze d'onda che esso mostra nello spettro di emissione (terza legge).

Dalle proprietà spettrali di una sorgente luminosa si possono ottenere informazioni sulla sua composizione chimica.

**Tabella 2.2** Stelle più vicine alla Terra

STELLA	COSTELLAZIONE	DISTANZA (ANNI LUCE)
$\alpha$ Centauri o Proxima Centauri	Centauri	4,3
Stella di Barnard	Ofiuco	6
Wolf 359	Leone	7,7
BD + 36° 2147	Orsa Maggiore	8,2
Luyten 726-8	Balena	8,4
Sirio	Cane Maggiore	8,6
Ross 154	Sagittario	9,4
Ross 248	Andromeda	10,4
$\epsilon$ Eridani	Eridano	10,8

## 2.2 La distanza delle stelle

Le principali unità di misura per le distanze in astronomia sono l'unità astronomica, l'anno luce e il parsec.

L'**unità astronomica (UA)** corrisponde alla distanza media fra la Terra e il Sole ed equivale a 149 600 000 km circa (è usata per fornire le distanze di oggetti all'interno del sistema solare).

L'**anno luce (al)** equivale alla distanza percorsa nell'arco di un anno dalla luce, che nel vuoto si muove a una velocità pari a 299 792 458 m/sec (tab. 2.2).

Il **parsec (parallasse-secondo, simbolo pc)** è la distanza di un punto dal quale si vedrebbe sotto l'angolo di 1" (secondo)

Unità astronomica

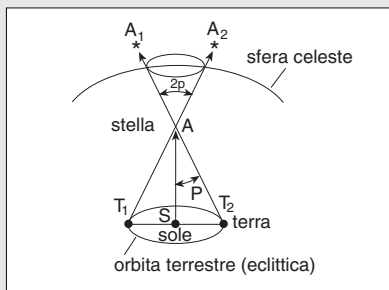
Anno luce

Parsec

### CHE COS'È LA PARALLASSE

La **parallasse** è lo spostamento apparente della posizione di una stella, rispetto a uno sfondo, causato da un cambiamento nella posizione dell'osservatore, dato dal

moto di rivoluzione terrestre. Essa corrisponde all'angolo, nel cui vertice si trova l'astro osservato, sotto il quale è vista la linea di base congiungente altri due punti (Sole e Terra) (fig. A). La parallasse per le stelle ha valori sempre molto piccoli, 0,7" (secondi d'arco) per la stella più vicina a noi (Proxima Centauri). Quanto più lontana è una stella, tanto più piccola è la sua parallasse.



#### Figura A

La parallasse  $p$  della stella  $A$  corrisponde all'angolo  $T_1AS$  quando la Terra si trova in  $T_1$ . Per effetto della parallasse, una stella viene vista descrivere, nel corso di un anno, un'ellisse sulla sfera celeste simile all'orbita terrestre.

do) d'arco il semiasse maggiore dell'orbita terrestre (cioè la distanza massima Terra-Sole; v. riquadro a p. 25). Il parsec corrisponde a 3,26 anni luce (per le corrispondenze tra le varie unità v. tab. 2.1.).

## 2.3 Il moto delle stelle

Le stelle "fisse"

Le stelle a occhio nudo sembrano mantenere inalterata nel tempo la loro posizione, tanto che si introdusse il termine di **stelle fisse**. In realtà, l'osservazione con il telescopio mostra che, durante il corso di una notte, le costellazioni seguono un moto che le fa sorgere a est e tramontare a ovest, descrivendo un grande arco che culmina a sud. Il moto degli astri, dovuto alla rotazione terrestre, è un moto solo apparente: la Terra, ruotando, offre all'osservatore panorami variabili dell'universo.

La Stella Polare

La **Stella Polare**, trovandosi a circa 1 grado dalla direzione dell'asse di rotazione terrestre, appare quindi ferma tutta la notte, mentre tutte le altre stelle appaiono invece in rotazione intorno a essa.

L'influenza della  
rivoluzione terrestre

In realtà, la Terra ha anche un moto di rivoluzione intorno al Sole, con durata di un anno, e quindi velocità di circa 1 grado al giorno. A causa del moto di rivoluzione terrestre, notte dopo notte le **costellazioni appaiono sorgere, culminare e tramontare circa 1 grado più a ovest e circa 4 minuti in anticipo rispetto alla notte precedente**. Questo significa che, mese dopo mese, nel mezzo della notte saranno osservabili costellazioni sempre diverse.

## 2.4 L'evoluzione stellare

Nel corso del tempo, la struttura di una stella subisce modificazioni, passando attraverso una serie di fasi, caratterizzate da luminosità e temperatura differenti, che rappresentano il ciclo di vita stellare.

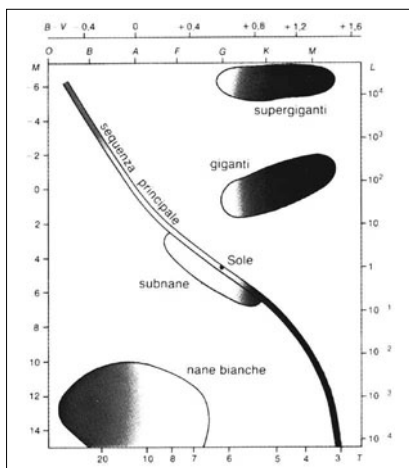
### ■ Il diagramma di Hertzsprung-Russell

Dipendenza  
fra temperatura  
superficiale  
e luminosità

Le principali tappe della vita delle stelle sono state ricostruite, indipendentemente, dall'astronomo danese E. Hertzsprung e dall'astronomo americano N.H. Russell in un diagramma statistico "a nube di punti" (**diagramma di Hertzsprung-Russell**, o **H-R**) che mostra l'esistenza di una dipendenza tra luminosità stellare e temperatura superficiale (fig. 2.1). La maggior parte dei punti, corrispondenti alle varie stelle, si distribuisce su una banda diagonale o sequenza principale che unisce la zona a basse temperature (rosse) e basse

**Figura 2.1**

Nel diagramma di Hertzsprung-Russell la temperatura superficiale delle stelle è messa in relazione con la loro luminosità. Il diagramma H-R è alla base della teoria dello sviluppo delle stelle, dalla loro formazione alla loro estinzione.



luminosità alla zona ad alte temperature (blu) e alte luminosità (se le due grandezze, luminosità e temperatura, fossero indipendenti, i punti corrispondenti alle diverse stelle dovrebbero distribuirsi a caso su tutto il diagramma). Per ogni stella si può così determinare la posizione utilizzando due coordinate: temperatura e luminosità. Sull'asse verticale del diagramma sono riportate le luminosità (o le magnitudini assolute) delle stelle dell'insieme: in alto si ritrovano i valori più elevati. Sull'asse orizzontale sono riportate le temperature: le più alte sono verso sinistra (al posto delle temperature si possono indicare le classi spettrali delle stelle).

Un grandissimo numero di stelle, appartenenti alla **sequenza principale**, si raccoglie lungo una fascia che attraversa trasversalmente il grafico. Sono stelle stabili, che si trovano nella fase media della propria vita; quanto più una di queste stelle è luminosa, tanto più è calda (e azzurra). Il Sole appartiene a questa sequenza e vi compare in posizione intermedia, come stella gialla.

Al di fuori della sequenza principale, nella parte in alto a destra del diagramma, compare la zona delle stelle **giganti rosse** (e quella delle **supergiganti**). La posizione corrisponde a temperature fredde e medie magnitudini; le stelle appartenenti a questo gruppo devono necessariamente essere enormi, dato che la potenza irradiata è proporzionale alla quarta potenza della temperatura (legge di Stefan-Boltzmann): l'alta luminosità è quindi associata all'estensione, cioè al diametro della stella stessa.

La sequenza principale

Le giganti rosse

Le nane bianche

In basso a sinistra si trova il gruppo delle **nane bianche**. Si tratta di stelle calde e poco luminose, che quindi devono essere piccole (con raggi simili a quello della Terra). L'appartenenza a un gruppo del diagramma H-R significa semplicemente che la stella si trova in una particolare fase della sua evoluzione.

La nascita di una stella

### ■ La vita delle stelle

Il processo di formazione delle stelle avviene all'interno di grandi nubi di gas (in prevalenza idrogeno) e polveri interstellari (nebulose) e ha inizio quando **una porzione di gas raggiunge una densità sufficiente a provocare un collasso gravitazionale del gas**. La compressione provoca il riscaldamento del gas, che verso il centro raggiunge una temperatura di alcuni milioni di gradi, innescando le prime reazioni di fusione nucleare dell'idrogeno (perché ciò accada, la massa della stella deve essere superiore a 0,08 volte la massa solare). **Il processo di fusione termonucleare** produce elio e un'enorme quantità di energia, che **contrastava il collasso gravitazionale** fino a bloccarlo completamente: **la stella raggiunge così una configurazione stabile**, che mantiene per buona parte della sua vita. Questa fase corrisponde alla permanenza della stella nella sequenza principale nel diagramma di Hertzsprung-Russell.

La configurazione stabile

La posizione e la permanenza di una stella nella sequenza principale dipendono dalla massa della nebulosa da cui si è originata: stelle nate con una grande massa diventano più calde (blu) e consumano il loro idrogeno nel giro di milioni di anni; stelle con massa piccola rimangono meno calde (rosse) e sono più longeve, miliardi di anni. Le stelle gialle rimangono nella sequenza circa 10 miliardi di anni: il Sole, che ha già 5 miliardi di anni, è una stella di "mezza età".

La decadenza: il passaggio a gigante rossa, nana, nova

**Quando quasi tutto l'idrogeno nel nucleo di una stella si è consumato** e al suo posto è subentrato elio, **le reazioni di fusione nucleare si interrompono**. Gli strati esterni della stella, non più "sostenuti", collassano e tale processo provoca un aumento della temperatura, sufficiente a innescare nuove reazioni di fusione termonucleari (v. riquadro). L'energia prodotta fa espandere l'involucro esterno di gas, che si raffredda tanto da cambiare colore e divenire rosso: si forma così una **gigante rossa**. Quel che avviene in seguito dipende dalla massa della stella.

Se la massa è simile a quella del Sole, la gigante rossa può perdere gli strati esterni al nucleo, che formano una nube in espansione (nebulosa planetaria); il nucleo resta "nudo", caldissimo, ma in assenza di reazioni nucleari, e si raffredda lentamente: appare sotto forma di **nana bianca**, destinata a tra-

## REAZIONI DI FUSIONE TERMONUCLEARE

Le reazioni nucleari nelle stelle sono dette termonucleari e assicurano il rifornimento energetico. Esse comportano la trasformazione di idrogeno, H, che costituisce mediamente circa il 70% della massa stellare, in elio, He, che assomma in media al 28%. Quanto al processo di trasformazione, è sufficiente ricordare che per giungere alla formazione di un nucleo attraverso la fusione nucleare, le particelle devono essere dotate di elevatissima energia cinetica, al fine di superare la barriera repulsiva di potenziale coulombiano:

le particelle devono, cioè, avvicinarsi fra loro a distanze inferiori al "raggio d'azione" ( $r$ ) delle forze nucleari ( $r \approx 10^{-13}$  cm). Nel 1938 il fisico tedesco H. Bethe formulò la teoria del bruciamento dell'idrogeno secondo due distinte catene di reazioni, dipendenti dalla temperatura: catena protone-protone e ciclo CNO (carbonio-azoto-ossigeno). Entrambe le catene formano, a partire da quattro protoni (nuclei di idrogeno,  $^1\text{H}$ ), un nucleo di elio-4,  $^4\text{He}$ , con liberazione di energia radiante e di energia cinetica dei prodotti della reazione.

sformarsi in un corpo oscuro di materia inerte (**nana nera**). Se la massa è un po' maggiore di quella del Sole, nella stella, durante la contrazione, si libera una quantità di energia tale da provocare delle vere esplosioni stellari, con espulsioni di nubi di materia verso lo spazio circostante. È questo lo stadio di **nova**.

Il collasso gravitazionale, quando la stella ha massa maggiore di almeno tre volte quella del Sole, è di così vaste proporzioni da provocare un'immane esplosione, a seguito della quale gran parte della stella si disintegra e viene lanciata nello spazio: è lo stadio di **supernova**. Si forma una nube di gas in rapida espansione, mentre il nucleo collassa rapidamente fino a formare una **stella di neutroni**, estremamente densa e compatta, che può emettere impulsi radio molto frequenti e precisi, presentandosi come **pulsar**.

Se la massa della stella è nettamente superiore a tre masse solari, il collasso gravitazionale prosegue indefinitamente. La densità continua ad aumentare e si forma un corpo sempre più piccolo, circondato da un campo gravitazionale immenso: si forma in tal modo un **buco nero**.

Lo stadio di supernova

Il collasso a buchi neri

## 2.5. Tipi di stelle

Gli stadi che una stella attraversa nella sua vita corrispondono anche ai diversi tipi di stelle che si possono osservare in cielo tramite gli strumenti astronomici.

### ■ Giganti rosse

Si tratta di stelle in cui, conseguentemente alla combustione dell'idrogeno in elio, si è formato un **nucleo molto denso**, il quale collassando provoca un riscaldamento in gra-

L'esaurirsi  
della combustione  
dell'elio

do di innescare successive reazioni termonucleari (che, a partire da nuclei di elio-4,  $^4\text{He}$ , danno origine a nuclei di carbonio-12,  $^{12}\text{C}$ ). A causa dell'alta temperatura, la stella si espande enormemente, originando una **gigante rossa**. Tale espansione abbassa la temperatura negli strati superficiali, facendo assumere alla stella il caratteristico colore rosso. In una gigante rossa la combustione dell'elio dura per un tempo pari a 1/5 di quello necessario per bruciare l'idrogeno quando la stella si trovava nella sequenza principale. Il meccanismo delle reazioni nucleari si ripete, ma non indefinitamente: quando l'elio si esaurisce, entrano in gioco altri combustibili nucleari (ferro-56,  $^{56}\text{Fe}$ ), che si esauriranno anch'essi, con conseguenti contrazioni e aumenti di temperatura e, quando tutti gli elementi si saranno esauriti, nessuna pressione dall'interno potrà opporsi alla compressione della forza gravitazionale.

### ■ Nane bianche

La contrazione  
gravitazionale

Nelle stelle con massa inferiore a 1,44 masse solari la pressione e temperatura del nucleo non arrivano a innescare la combustione del carbonio e dell'ossigeno: la stella residua inizia a raffreddarsi, formando una **nana bianca**. **Inizia la contrazione gravitazionale**, che si arresta solo quando è bilanciata dalla pressione del gas nel nucleo (la densità è di alcune tonnellate per centimetro cubo). **A causa della bassa luminosità, le nane bianche sono difficilmente osservabili**; con il passare del tempo, la stella si raffredderà sempre più, diventando una scura e fredda sfera di carbonio e ossigeno solidi, più o meno delle dimensioni della Terra (**nana nera**).

### ■ Nove

Gigante rossa  
e nana bianca

**Le stelle con nuclei di massa superiore a 1,44 masse solari** attraversano fasi di contrazione e di fusione nucleare, producendo nel loro nucleo elementi sempre più pesanti. **Le nove sono stelle di tipo esplosivo, componenti di sistemi binari di stelle**, costituiti di norma da una gigante rossa e da una nana bianca. La nana bianca attira gravitazionalmente l'idrogeno dalla gigante rossa e in tal modo si accresce, causando l'aumento della pressione e della temperatura nello strato superficiale. Raggiunta la temperatura di innesco della fusione nucleare, la nova esplode, con un improvviso aumento della luminosità stellare che dura per qualche giorno, per poi tornare, con il passare del tempo, alle condizioni iniziali.

### ■ Supernove

Quando la massa di una stella è di almeno una decina di

volte maggiore di quella del Sole, si giunge alla formazione di un nucleo di ferro-56,  $^{56}\text{Fe}$ , non più in grado di liberare ulteriore energia: come conseguenza, **la stella collassa e la temperatura si innalza fino ad alcuni miliardi di gradi** in brevissimo tempo; quando i gusci più esterni in contrazione si imbattono nel nucleo solido, generano un'onda d'urto, che si propaga verso l'esterno della stella; giunta sulla superficie della stella, l'onda trascina una grande quantità di gas nello spazio esterno alla stella: si realizza così un'immane **"esplosione di supernova"** e la luminosità della stella cresce enormemente, raggiungendo in poche ore valori fino a circa un miliardo di volte superiori rispetto a quella del Sole. La **supernova** arricchisce lo spazio interstellare circostante di molti elementi pesanti, ciò che resta del suo nucleo è una stella di neutroni o, alternativamente, quando si parte con differenti condizioni iniziali, un buco nero.

L'esplosione  
di supernova

### ■ Stelle di neutroni e pulsar

Dopo l'esplosione di una supernova, il materiale che rimane collassa per gravità: si forma un **nucleo estremamente denso di neutroni, che viene detto stella di neutroni**, sede di intensi campi magnetici.

Le stelle di neutroni

Nel 1967 sono state scoperte altre sorgenti simili, chiamate **pulsar**, cioè **sorgenti di onde radio pulsanti**. Il periodo di rotazione di una pulsar è destinato ad aumentare nel tempo. Alcune pulsar fanno parte di sistemi doppi, cioè sono legate gravitazionalmente a un'altra stella. In questa situazione, durante la rotazione la stella di neutroni attira su di sé materia dalla sua compagna, con la conseguenza di modificare la sua velocità di rotazione.

Le pulsar

### ■ Buchi neri

Un **buco nero** è un **oggetto celeste**, con diametro variabile da 10 a 30 km, **la cui materia è eccezionalmente addensata ed esercita un'attrazione gravitazionale così intensa da impedire alla materia stessa, alla luce e a qualunque altra radiazione elettromagnetica di sfuggirne**. È presumibilmente lo stadio finale dell'evoluzione di una stella di grande massa (almeno tre volte quella del Sole): in questo caso, quando la stella esplode come supernova, la sua parte centrale subisce un violento collasso gravitazionale, che comprime la materia indefinitamente generando il buco nero, che successivamente può catturare altra materia e aumentare così la propria massa fino a valori di milioni di volte quella del Sole; prima di "cadere" nel buco nero, la materia gli ruota attorno muovendo a spirale e formando un disco di

Nuclei di materia  
eccezionalmente  
addensata



accrescimento. In questa zona dello spazio si instaura un campo gravitazionale intensissimo.

## 2.6 Le costellazioni

Le costellazioni sono 88

In base a una convenzione sottoscritta nel 1928 dall'Unione Astronomica Internazionale, tutto il cielo è stato suddiviso in 88 **costellazioni**: 18 boreali, 36 australi e 34 equatoriali.

Le costellazioni conservano il nome attribuito dalla tradizione occidentale, che nella disposizione delle stelle vedeva l'immagine di animali, personaggi mitologici e oggetti (Orsa Maggiore, Orione, Leone ecc.). Tra le più antiche sono le costellazioni dello zodiaco, immaginate dai Caldei e dai Babilonesi, che ne hanno riconosciute 12 lungo l'eclittica, cioè in corrispondenza del cammino apparente del Sole sulla volta celeste: *Aries, Taurus, Gemini, Cancer, Leo, Virgo, Libra, Scorpius, Sagittarius, Capricornus, Aquarius, Pisces*; da queste è poi derivata la suddivisione dell'anno solare in 12 mesi.

I moti delle costellazioni

Le 48 costellazioni introdotte da Tolomeo comprendono i principali raggruppamenti visibili dalla latitudine di Alessandria d'Egitto. Tra queste, alcune sono estremamente deboli e maldefinite, il che fa pensare che abbiano perduto luminosità nel tempo. **La forma delle costellazioni**, anche considerando tempi lunghissimi, **non si modifica**. Le stelle, infatti, pur essendo dotate di moto proprio, si spostano molto lentamente nel cielo. **Il loro moto complessivo apparente è dovuto ai moti diurno e annuo della Terra** e avviene mantenendo inalterata la loro posizione relativa. Le costellazioni di Tolomeo non coprono però tutto il cielo, sia perché tra esse esistevano vuoti che sarebbero stati riempiti solo successivamente, sia perché Tolomeo e i Greci non avevano mai osservato stelle del cielo australe. A quelle descritte da Tolomeo si sono quindi aggiunte numerose altre costellazioni, spesso con nomi presi da strumenti scientifici appena scoperti, (come, per esempio, *Telescopium, Microscopium*).

Le costellazioni non hanno una realtà fisica

Le costellazioni non hanno una realtà fisica, in quanto le stelle che le costituiscono sono estremamente lontane tra loro e appaiono vicine solo per effetto della prospettiva, ma costituiscono uno strumento utilissimo per identificare una qualsiasi zona del cielo. Secondo convenzioni internazionali consolidate, le stelle più luminose di ogni costellazione sono indicate con il nome di una lettera dell'alfabeto greco in ordine decrescente di luminosità (alfa, beta ecc.), seguita dall'abbreviazione del genitivo del nome latino della costellazione di appartenenza.

Il catalogo di stelle più completo è stato per moltissimi anni quello dello Smithsonian Astrophysical Observatory (SAO), contenente le posizioni e le caratteristiche di circa 250 000 stelle. Successivamente è stato introdotto il catalogo di riferimento per il telescopio spaziale Hubble, contenente circa 2 milioni di stelle.

## GLOSSARIO

### Collasso gravitazionale

Una contrazione del gas dovuta alla forza di gravità che si esercita fra le varie parti.

### Fotometro

Cellula fotoelettrica che trasforma l'energia luminosa in corrente elettrica.

### Nebulosa

Nube formata da gas interstellare e polveri. Contiene prevalentemente idrogeno, con tracce di altri atomi (elio, ossigeno e azoto ecc.) e, in alcuni casi, molecole semplici (monossido di carbonio e acqua) o più complesse (formaldeide).

### Nova

Stelle che manifestano un improvviso e fortissimo aumento di luminosità, fino a 150 000 volte quella iniziale.

### Quasar

Dall'espressione inglese *Quasi Stellar Astronomical Radiosource*, oggetto dal-

l'apparenza stellare, le righe del cui spettro sono fortemente spostate verso il rosso. I quasar corrispondono a nuclei di galassie attive molto distanti, spesso fortemente radioemittenti.

### Spettro

Ogni suddivisione nelle varie componenti di una radiazione elettromagnetica emessa da una sorgente. Il metodo più semplice per analizzare un raggio di luce consiste nel farlo cadere su un prisma che lo rifrange e lo disperde in tanti raggi, ciascuno dei quali corrisponde a una delle frequenze componenti. Se si raccolgono i raggi emergenti su uno schermo, per ogni frequenza appare una striscia continua di diversi colori e di intensità variabile. Lo strumento usato per questo tipo di analisi è lo spettroscopio.

## TEST DI VERIFICA

**1** Nel diagramma di H-R non è incluso uno di questi tipi stellari:

- a gigante rossa;
- b nana bianca;
- c stella di sequenza principale;
- d pulsar.

**2** Il destino di una stella dipende dalla sua iniziale:

- a temperatura;
- b massa;
- c magnitudine;
- d colore.

**3** Nel diagramma di H-R una stella fredda si trova :

- a a destra;
- b a sinistra;
- c al centro;
- d nessuna delle precedenti.

**4** Qual è la differenza tra magnitudine apparente e assoluta?

**5** Che cos'è la classe spettrale?

**R**

1 d; 2 b; 3 a; 4 pp. 22-23; 5 p. 25.

# 3 Il sistema solare

---

*Il sistema solare è costituito dal **Sole** e dall'insieme dei corpi celesti che gli gravitano intorno: i nove **pianeti** con i loro **satelliti**, gli **asteroidi** e le **comete**. L'invio di numerose sonde spaziali ha permesso di estendere la nostra conoscenza sugli elementi del sistema solare e di raccogliere numerose informazioni riguardo alla loro origine, evoluzione, struttura e orbita.*

## 3.1 Origine del sistema solare

Età del sistema solare

I metodi di datazione radioattiva permettono di assegnare **un'età massima di circa  $4,5 \times 10^9$  anni alle rocce della Terra** e di avanzare una stima analoga per l'età delle rocce lunari e di alcuni meteoriti. Per il Sole, studiando struttura ed evoluzione, **si stima un'età massima di quasi  $5 \times 10^9$  anni**. Tenendo conto di questa concordanza tra i vari dati, si può affermare che i primi eventi collegati alla formazione dei pianeti ebbero inizio circa 4,6 miliardi di anni fa.

Gli interrogativi della teoria sul sistema solare

Una teoria circa l'origine del sistema solare deve essere in grado di spiegare in modo coerente i seguenti tipi di osservazioni:

1. il sistema solare è isolato dagli altri oggetti celesti e costituito soprattutto di spazio vuoto, essendo la massa concentrata per il 99% nel Sole;
2. i pianeti ruotano intorno al Sole e intorno al proprio asse, muovendosi su orbite che giacciono all'incirca su uno stesso piano (con poche eccezioni);
3. i pianeti si dividono in due gruppi, in funzione di massa e composizione;
4. esiste una fascia di asteroidi che segna un limite tra i due gruppi di pianeti;
5. le superfici dei corpi del sistema solare sono tormentate da crateri di svariate dimensioni, la cui età è di circa 4 miliardi di anni;
6. i materiali reperiti mostrano un'età massima di 4,6 miliardi di anni.

Teoria nebulare

Fra le teorie proposte in passato, quando i dati disponibili erano decisamente esigui rispetto a quelli attuali, si segnalano quella di Kant-Laplace e quella di Jeans.

La **teoria nebulare** proposta da I. Kant (1755) e P. Laplace (1796) ipotizzava che **il sistema solare avesse avuto origine da una nebulosa rotante e in contrazione**, la nebulosa presolare, dalla quale per effetto centrifugo si sarebbero

staccati degli anelli che avrebbero poi formato per condensazione pianeti e satelliti.

Verso il 1900 J. Jeans sviluppò la **teoria catastrofica**, che prevedeva un evento violento, non ripetuto: l'**incontro ravvicinato del Sole con un'altra stella**, che avrebbe dato luogo a una colossale onda di marea, con conseguente estrazione di materia dalla massa solare, entro la quale si sarebbero poi formati i pianeti, più grandi al centro e più piccoli agli estremi. Tale teoria è oggi abbandonata: calcoli di verifica hanno dimostrato che il materiale espulso ad alta velocità si disperderebbe nello spazio, anziché condensare in pianeti. Ricerche condotte negli ultimi anni hanno permesso di fissare le grandi linee del presumibile processo che ha portato alla formazione dei pianeti.

Teoria catastrofica

Oggi è concordemente accettata l'ipotesi (**teoria dell'accumulazione**) secondo cui, circa 5 miliardi di anni fa, **il Sole e gli altri corpi del sistema solare si formarono contemporaneamente all'interno di una nube primordiale di gas e polveri**, dotata di un lento moto di rotazione su se stessa. Come conseguenza di perturbazioni gravitazionali, **la nube cominciò a collassare su se stessa** e la sua velocità di rotazione andò aumentando man mano che le particelle di materia andavano "cadendo" verso il suo centro; per effetto della rotazione, la nube si contrasse e assunse la forma di un disco appiattito, al cui centro andava accumulandosi la maggior parte della materia originaria, mentre la materia residua andava condensandosi in una serie di anelli periferici ruotanti intorno al centro. A un certo punto, **la massa centrale collassò su se stessa** per effetto della gravità, **dando origine al Sole. Negli anelli periferici si formarono i pianeti**, come risultato di una complessa sequenza di processi di accumulazione e di aggregazione di polveri e di gas, dapprima in piccoli granuli e via via in corpi di massa maggiore (planetesimi): questi, attraendosi gravitazionalmente, formarono ammassi maggiori, i futuri pianeti.

Teoria dell'accumulazione

La nube è più fredda alla periferia e diventa più calda man mano che ci si avvicina al centro e tale **differenza di temperatura determina differenze fra gli oggetti che si vanno formando**. I corpi più vicini al Sole, posti quindi in una zona più calda, non furono in grado di trattenere un'atmosfera formata da elementi leggeri (idrogeno ed elio): si formarono così i pianeti minori, la Luna e gli asteroidi, tutti prevalentemente rocciosi. Nelle regioni più lontane, più fredde, si formarono i pianeti maggiori, costituiti soprattutto da acqua, metano e ammoniaca congelati, e le comete. Questa ipotesi rende conto, per esempio, della divisione tra pianeti terre-

La spiegazione delle differenze tra i pianeti

stri, più densi, e pianeti giganti, prevalentemente gassosi (v. par. 3.3). Nei corpi più densi di massa maggiore, come la Terra, ha luogo un'ulteriore evoluzione: il materiale addensato precipita verso il centro e il calore generato dagli elementi radioattivi, aumentando la temperatura, ne determina una fusione parziale. Questo altera la distribuzione interna del materiale; le parti più leggere tendono a "galleggiare" in superficie (crosta di silicati), mentre quelle più pesanti, separandosi, si distribuiscono verso il centro (nucleo metallico).

## 3.2 Il Sole

Che cos'è il Sole

Il Sole, collocato al centro del sistema planetario, si presenta come una **gigantesca sfera di gas ionizzati (plasma) che irraggia energia sotto forma di radiazioni elettromagnetiche e corpuscolari**. Da essa deriva la maggior parte dell'energia che si manifesta e che viene utilizzata sulla Terra.

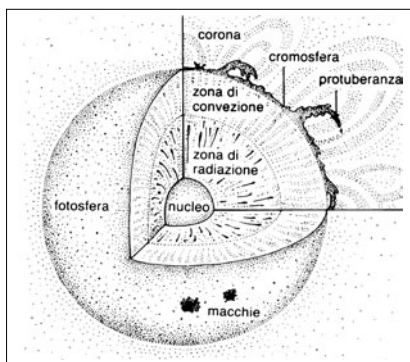
**Il Sole è una stella** della sequenza principale, **di tipo spettrale G2** (quinta classe di luminosità), quindi di colore giallo. Ha un raggio di circa 696 500 km (pari a 109 volte il raggio della Terra) e una massa di  $1,99 \times 10^{30}$  kg (equivalente a circa 330 000 volte la massa terrestre e a 750 volte la massa di tutti i corpi del sistema solare). La densità media solare è di  $1,41 \text{ g/cm}^3$ ,  $1/4$  della densità media della Terra. La temperatura superficiale è di circa  $5700^\circ\text{C}$ . L'accelerazione di gravità sulla superficie è 28 volte quella terrestre (tab. 3.1).

### ■ Struttura interna

Come le altre stelle, il Sole è una sfera di gas ad altissima temperatura, la cui materia è tenuta insieme dall'attrazione

**Tabella 3.1** Caratteristiche del Sole

raggio	696 500 km (109 volte quello terrestre)
massa	$2 \times 10^{33}$ g (333 400 volte quella terrestre)
densità media	$1,41 \text{ g/cm}^3$ (un quarto di quella terrestre)
temperatura superficiale	$5700^\circ\text{C}$
accelerazione di gravità alla superficie	$274 \text{ m/s}^2$ (28 volte quella terrestre)
distanza dalla Terra	da 147,1 a 152,1 milioni di km; in media 149,6 milioni di km
diametro angolare apparente del disco	da $31'27''$ a $32'30''$

**Figura 3.1**Sezione schematica  
del Sole.

gravitazionale (fig. 3.1). Si distingue una parte interna, non visibile, e una parte esterna (atmosfera solare).

Nella parte interna si ipotizza la presenza di un **nucleo**, in cui avvengono le reazioni di fusione termonucleare che generano l'energia della stella. Intorno al nucleo si estende la **zona di radiazione**, o **zona radiativa**, un guscio sferico di gas, in cui l'energia, emessa prevalentemente sotto forma di raggi gamma, viene continuamente assorbita e riemessa dal gas. Segue uno strato in cui l'energia viene trasportata attraverso i moti convettivi dei gas, detto **zona di convezione**, o **zona convettiva**, spessa circa il 30% del raggio solare. Del Sole è visibile solo la parte più esterna, composta di tre strati che, andando dall'interno all'esterno, sono la fotosfera, la cromosfera e la corona; cromosfera e corona costituiscono l'atmosfera solare, struttura complessa e sede di processi violenti e variabili nel tempo.

La radiazione continua del Sole ha origine nella **fotosfera** (dal greco, sfera di luce), strato più basso dell'atmosfera e spesso poche centinaia di chilometri, con temperature di circa 4300-9000 °C. Tipiche della fotosfera sono le **macchie solari**: zone che appaiono più scure sulla superficie del Sole per contrasto con la fotosfera circostante. Queste aree, alle quali è associato un elevatissimo campo magnetico, possiedono un nucleo centrale (ombra) circondato da una regione chiara (penombra). La loro posizione varia nel tempo per effetto della rotazione del Sole, variabile in funzione della latitudine. Nel 1850 si scoprì che il numero totale di macchie visibili sulla superficie solare varia da un valore massimo a uno minimo secondo una ciclicità di 11 anni (ciclo di attività solare).

Al di sopra della fotosfera si estende la **cromosfera**, regione di gas rarefatto spessa 2000 km, con strutture allungate (spi-

Nucleo

Zona radiativa

Zona convettiva

Fotosfera e macchie  
solari

Cromosfera

	cole) che si innalzano fino a 10 000 km. Nella cromosfera la temperatura media sale a circa 15 000 °C.
Corona	La <b>corona</b> , ultimo strato del Sole, è costituita da gas estremamente rarefatto e la temperatura è dell'ordine del milione di gradi. La corona è visibile durante le eclissi totali di Sole (o usando particolari strumenti, i coronografi).
	<b>■ Attività solare</b>
La granulazione	Il gas, riscaldato dalla radiazione che proviene dall'interno del nucleo, si muove convettivamente, generando nella fotosfera una serie di <b>celle chiare</b> (la testa superiore della colonna ascendente di gas caldo) e <b>zone circostanti scure</b> (là dove il gas, raffreddandosi, si reimmerge); questa struttura viene chiamata <b>granulazione</b> .
Le protuberanze	Eventi più spettacolari sono le <b>protuberanze</b> , <b>grandi emissioni di materia</b> che si allontana dal Sole fino a decine di migliaia di chilometri di altezza, e i brillamenti, violenti aumenti di luminosità in una piccola regione della cromosfera e della corona, accompagnati da emissioni di raggi X e particelle accelerate e correlati a sottostanti macchie solari. La corona, a causa della sua altissima temperatura, si espande nello spazio formando il <b>vento solare</b> , <b>un flusso di particelle e campi magnetici</b> che si estende per tutto il sistema solare. Perturbazioni nel vento solare che giunge alla Terra innescano tempeste geomagnetiche, che agiscono sul campo magnetico terrestre, e le aurore polari, colorati drappaggi di luce che si formano nella nostra atmosfera a qualche decina di chilometri di quota (fra la mesosfera e la termosfera). Si ritiene che le manifestazioni di attività solare siano pilotate dalla disposizione, dall'intensità e dal comportamento dei campi magnetici presenti in prossimità della superficie solare.
Il vento solare	L'energia totale irradiata dal Sole è determinata in base alla <b>costante solare</b> , che è la <b>quantità di energia che nell'unità di tempo colpisce l'unità di area situata al di fuori dell'atmosfera terrestre</b> e posta perpendicolarmente alla direzione dei raggi solari; il valore della costante solare è di $1,374 \text{ kW/m}^2$ al minuto. Complessivamente, la quantità di energia che il Sole irradia annualmente entro l'atmosfera terrestre è di $5,47 \times 10^{24}$ joule e di essa circa il 70% raggiunge la superficie terrestre.
La costante solare	

### 3.3 I pianeti

I pianeti (dal greco *planào*, vagare) del sistema solare si distinguono dalle stelle fisse in quanto si muovono sulla volta del cielo (nel riquadro a p. 40 sono descritte le leggi che governano il moto dei pianeti).

Si conoscono nove pianeti: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone. A seconda che le loro orbite siano maggiori o minori di quella terrestre, i pianeti sono distinti in **pianeti esterni**, o superiori (da Marte a Plutone), e **pianeti interni**, o inferiori (Mercurio e Venere). In base ad analogie nella costituzione fisica, i vari pianeti si possono suddividere in **pianeti terrestri** (Mercurio, Venere, Terra e Marte) e **pianeti gioviani** (Giove, Saturno, Urano, Nettuno e Plutone); di questi i primi tre sono anche detti pianeti giganti per le loro dimensioni, di vari ordini di grandezza superiori a quelle della Terra (tab. 3.2).

**Tabella 3.2** Principali caratteristiche dei pianeti del sistema solare

	MERCURIO	VENERE	TERRA	MARTE
<b>distanza media dal Sole</b>	57,9 milioni di km	108,2 milioni di km	149,6 milioni di km	227,9 milioni di km
<b>diametro equatoriale</b>	4880 km	12 104 km	12 756 km	6787 km
<b>massa</b> (Terra = 1)	0,055	0,815	1	0,108
<b>volume</b> (Terra = 1)	0,06	0,86	1	0,15
<b>atmosfera</b>	nessuna	diossido di carbonio	azoto, ossigeno	diossido di carbonio
<b>periodo di rotazione</b>	59 g	243 g	23h 56min	24h 37min
<b>periodo di rivoluzione</b>	88 g	224,7 g	365,26 g	687 g
<b>gravità</b> (Terra = 1)	0,37	0,88	1	0,38

	GIOVE	SATURNO	URANO	NETTUNO	PLUTONE
<b>distanza media dal Sole</b>	778,3 milioni di km	1427 milioni di km	2869,6 milioni di km	4496,6 milioni di km	5900 milioni di km
<b>diametro equatoriale</b>	142 800 km	120 000 km	51 800 km	49 200 km	3000 km
<b>massa</b> (Terra = 1)	317,9	95,2	14,6	17,2	0,0017
<b>volume</b> (Terra = 1)	1316	755	67	61	0,01
<b>atmosfera</b>	idrogeno, elio	idrogeno, elio	idrogeno, elio, metano	idrogeno, elio, metano	non rilevata
<b>periodo di rotazione</b>	9h 50,5min	10h 14min	16h	16h	6g 9h
<b>periodo di rivoluzione</b>	11,86 anni	29,46 anni	84 anni	164,8 anni	247,7 anni
<b>gravità</b> (Terra = 1)	2,64	1,13	1,17	1,18	0,03



## LEGGI CHE GOVERNANO I MOTI DEI PIANETI

Nell'antichità, l'universo era rappresentato come un insieme di sfere concentriche rispetto alla Terra e su ognuna era localizzato un "astro"; il tutto era poi racchiuso da una sfera opaca con fori, attraverso i quali giungeva la luce dell'empireo. Tali concezioni sono esposte dal matematico, astronomo e geografo greco C. Tolomeo (I secolo d.C.). Tolomeo colloca la Terra, immobile, al centro dell'universo; intorno a essa ruotano la Luna, Mercurio, Venere, il Sole, Marte, Giove, Saturno e la sfera delle stelle fisse. Questo "modello", noto come **sistema tolemaico**, (o sistema geocentrico), venne accettato fino al XVII secolo, quando ne fu dimostrata l'infondatezza a fronte del nuovo modello proposto da N. Copernico (1473-1543), noto come **sistema copernicano** (o sistema eliocentrico), secondo cui la Terra e gli altri pianeti si muovono intorno al Sole, descrivendo traiettorie dette orbite (un moto orbitale completo di un pianeta intorno al Sole è chiamato **rivoluzione**). Il tempo impiegato a percorrere un'intera orbita è detto **periodo di rivoluzione** (per esempio, il periodo di rivoluzione della Terra è pari a un anno).

Le caratteristiche del moto dei pianeti nel sistema solare sono state definite all'inizio del Seicento dall'astronomo tedesco G. Keplero (1571-1630). Sulla base dell'osservazione diretta del cielo, egli individuò tre leggi che descrivono il movimento dei pianeti.

### **Le leggi di Keplero**

La **prima legge di Keplero** sostiene che l'orbita di ciascun pianeta è un'ellisse di cui il Sole occupa uno dei fuochi. Percorrendo la propria orbita ellittica, ciascun pianeta viene a trovarsi a distanze diverse dal Sole, che variano tra due posizioni estreme: quella di massima distanza è l'**afelio**; quella di minima distanza è il **perielio**.

La **seconda legge di Keplero** afferma che ciascun pianeta si muove sulla propria or-

bita con velocità variabile: più rapidamente quando è più vicino al Sole, più lentamente quando è più lontano.

La **terza legge di Keplero** sostiene che i pianeti più vicini al Sole si muovono sulle proprie orbite più velocemente di quelli più lontani. I rapporti fra tali velocità sono regolati da una legge matematica: il rapporto fra i quadrati dei periodi di rivoluzione di due pianeti qualsiasi è uguale al rapporto fra i cubi delle loro distanze medie dal Sole.

Le tre leggi, frutto dell'osservazione diretta del moto dei pianeti nel cielo, descrivono come si muove un pianeta intorno a una stella, ma non ci dicono cosa determina tale movimento.

### **La legge di gravitazione universale**

Nel 1687 I. Newton (1642-1727) scoprì che il Sole, dotato di una massa molto grande, trattiene i pianeti e li costringe a ruotargli intorno. La **legge di gravitazione universale** viene così espressa: due corpi si attraggono con forza direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato delle loro distanze. La più semplice verifica della legge di Newton è la forza di gravità agente sulla Terra: qualsiasi oggetto tende a cadere al suolo appunto perché è attratto dalla massa del nostro pianeta. Nel caso del sistema solare, i piccoli pianeti dovrebbero essere attratti dalla grande massa del Sole e cadervi sopra. Da ciò non accade, perché tale forza di attrazione (detta anche **centripeta**, in quanto diretta verso il Sole che è al centro del sistema) è perfettamente bilanciata dalla forza **centrifuga** sviluppata dal moto di rivoluzione dei pianeti. I pianeti più vicini al Sole, e quindi attratti da una forza gravitazionale centripeta maggiore, devono controbilanciarla sviluppando una forza centrifuga opposta, tramite un movimento rotatorio più veloce. I pianeti più distanti e attratti da una forza minore possono ruotare più lentamente (seconda legge di Keplero).

Il sistema solare comprende anche asteroidi o pianetini (detti anche pianeti minori) e corpi minori, tra cui comete, meteore e meteoriti (v. riquadro a p. 42).

### ■ Pianeti terrestri

**Mercurio** è il pianeta più interno del sistema solare, poco conosciuto fino ai passaggi della sonda *Mariner 10* (1974 e 1975), poiché le piccole dimensioni e la vicinanza al Sole ne rendono difficile l'osservazione; esso sorge e tramonta entro circa 1 ora dal levare e dal tramontare del Sole e deve perciò essere osservato basso sull'orizzonte. Ciò fa sì che la sua immagine da Terra sia disturbata dalla turbolenza atmosferica.

La temperatura superficiale varia da più di 327 °C nell'emisfero posto al Sole a un minimo di - 103 °C nell'emisfero in ombra.

L'orbita è notevolmente ellittica e non possiede satelliti. Mercurio è molto simile alla Luna: mostra una superficie coperta da crateri di impatto meteorico, conservatisi intatti per miliardi di anni data l'assenza di acqua e atmosfera, con pianure estese, probabilmente di origine vulcanica (anche se non è stata osservata la presenza di vulcani attivi). Possiede una tenue atmosfera, composta essenzialmente da gas nobili, catturati dal vento solare o emessi da rocce per decadimento radioattivo. Mercurio ha un periodo di rivoluzione siderale di 88 giorni terrestri e ruota attorno a se stesso con un periodo di 58,6 giorni, (intervallo pari ai 2/3 di quello di rivoluzione siderale).

**Venere** ha dimensioni, massa e densità abbastanza vicine a quelle della Terra, ma la sua temperatura superficiale di circa 477 °C ne rende improbabile lo sviluppo della vita così come noi lo intendiamo. Venere non possiede satelliti.

L'atmosfera venusiana, densa e spessa più di 80 km, composta quasi interamente da anidride carbonica (o diossido di carbonio, CO<sub>2</sub>), impedisce di osservare dalla Terra la sua superficie. Le nubi che la compongono sono formate da goccioline di acido solforico e acqua e sono in grado di intrappolare una frazione dell'energia solare incidente. Venere possiede catene montuose: la massima elevazione è il Monte Maxwell, alto 11 km. È stata rilevata la presenza di vulcani attivi.

La rotazione è retrograda, cioè avviene in senso opposto a quello del moto orbitale.

Per lo studio dettagliato del globo terrestre e dei suoi aspetti strutturali si rimanda ai prossimi capitoli. Ci limiteremo in questa sede ad accennare che la forma della **Terra** è, in prima approssimazione, quella di un ellissoide di rotazione; es-

sa possiede inoltre una struttura interna stratificata (suddivisa in crosta, mantello e nucleo). Il campo magnetico, prevalentemente dipolare, ha origine quasi certamente nell'effetto dinamo ad autoeccitazione, dovuto al movimento di cariche elettriche nel fluido conduttore presente all'interno del nucleo (v. a p. 140). L'atmosfera terrestre è formata per circa 1/5 da ossigeno e per circa 4/5 da azoto (v. a p. 105). La Terra possiede un suo satellite, la Luna (v. par. 3.4), privo sia di acqua, sia di atmosfera.

Marte

**Marte** è riconoscibile per il caratteristico colore rossastro; Marte ha due calotte chiare ai poli, formate da ghiaccio di acqua e anidride carbonica, le cui dimensioni variano con l'alternarsi delle stagioni. Il suo diametro è circa metà di quelli di Terra e Venere, poco più grande di quello di Mercurio.

#### CORPI MINORI DEL SISTEMA SOLARE: COMETE, METEORE, METEORITI

Le **comete** (dal greco *kométes*, fornito di chioma) sono i più spettacolari fra i costituenti minori che gravitano intorno al Sole su orbite ellittiche di grande eccentricità. È ipotesi diffusa che si siano formate contemporaneamente al Sole e ai pianeti in una "nube" di nuclei cometari che circonda il sistema planetario e che si estende fino a quasi 2,5 anni luce di distanza dal Sole (nube di Oort, dal nome dell'astronomo danese J. Oort). Si tratta di corpi con massa relativamente piccola, concentrata in un nucleo di forma irregolare. Il nucleo è paragonabile a una massa spugnosa, costituita prevalentemente da acqua ghiacciata mista a diossido di carbonio, monossido di carbonio, metano e ammoniaca, tutti in forma solida; nel nucleo sono inoltre imprigionati frammenti solidi (polveri). Quando una cometa si avvicina al Sole, il suo nucleo sublima, formando una nube di vapori, la **chioma**, che avvolge la cometa; per la pressione esercitata dal vento solare, la chioma viene spinta in direzione opposta a quella del Sole formando una lunga **coda**.

In base al loro periodo di rivoluzione intorno al Sole le comete vengono suddivise in:

- comete di breve periodo (meno di 20 anni);

- comete di periodo intermedio (da 20 a 200 anni);
- comete di lungo periodo (da 200 a 1 000 000 di anni);
- comete con orbite quasi paraboliche.

Le **meteoroidi** sono costituite da frammenti di roccia di varie dimensioni appartenenti al sistema solare, che si muovono ad alta velocità nello spazio. Quando entrano in contatto con l'atmosfera terrestre, la loro superficie, per l'attrito con l'aria, si arroventa ed esse bruciano. Intorno alle meteoroidi si produce un involucro di gas luminoso. Le scie di luce che solcano il cielo costituiscono il fenomeno delle "stelle cadenti". Si presume che le meteoroidi siano particelle solide appartenute a nuclei di comete. Gli sciame di meteoroidi prendono il nome dalla costellazione che si trova in quel punto nel cielo da cui sembrano provenire.

I **meteoriti** sono frammenti di materia di dimensioni considerevoli e peso notevole che, pur incendiandosi nell'atmosfera e disintegrandosi parzialmente, riescono a raggiungere la superficie terrestre, formando a volte grandi crateri. Secondo la loro composizione, vengono suddivise in meteoriti metalliche (ferro e nichel), litoidi (silicati), carbonacee (alto contenuto di carbonio) ecc.

Marte è un pianeta geologicamente attivo (sulla sua superficie è stata rilevata un'intensa attività vulcanica); non si osserva la presenza di acqua allo stato liquido. Nell'atmosfera prevale l'anidride carbonica, con piccole quantità di azoto, ossigeno, monossido di carbonio e argo.

Nel 1877 l'astronomo italiano G. Schiapparelli (1835-1910) credette di scoprire una **rete di "canali" quasi rettilinei**, che solcano la superficie congiungendo piccole "oasi". Queste osservazioni fecero avanzare l'ipotesi che i canali potessero essere opera di esseri intelligenti. Oggi sappiamo che i canali di Schiapparelli sono la **conseguenza di un effetto ottico**.

Marte possiede **due satelliti**, Phobos e Deimos, di forma irregolare e superficie segnata da crateri.

## ■ Pianeti gioviani

**Giove è il più grande dei pianeti**; rispetto alla Terra possiede una massa 318 volte maggiore e il diametro equatoriale è superiore di oltre 11 volte. Giove ha una struttura fluida; il nucleo è composto da ferro e silicati. Giove

**L'atmosfera di Giove ha una struttura** a strati; il suo caratteristico aspetto a zone bianco-giallastre e fasce bruno-rosicce, che si alternano parallelamente spostandosi a velocità differenti, è dovuto alla massa fluida e a nubi che ruotano a velocità diverse. La caratteristica più evidente dello strato superiore dell'atmosfera di Giove consiste in una **grande macchia rossastra di forma ellittica**: si tratta di un gigantesco ciclone, che si mantiene straordinariamente stabile nel tempo (fu osservato già nel Seicento con i primi telescopi). Giove ha un forte appiattimento polare, dovuto all'alta velocità di rotazione, e un caratteristico campo magnetico.

**I satelliti di Giove conosciuti sono 16**. Fra questi, hanno particolare rilievo quelli scoperti da Galileo: Io, Europa, Ganimede e Callisto (in ordine di distanza crescente da Giove). Ganimede ha diametro più grande del pianeta Mercurio; gli altri hanno tutti dimensioni maggiori della Luna. Io, Europa e Ganimede possiedono un'atmosfera; su Io sono stati rilevati vulcani attivi. Su Europa, Ganimede e Callisto vi è acqua allo stato solido in abbondanza; Europa potrebbe possedere anche acqua allo stato liquido. Ganimede e Callisto mostrano una superficie solida tormentata (la crosta di entrambi si è solidificata da tempo). I satelliti di Giove

Giove possiede un anello, simile ai ben noti anelli di Saturno e probabilmente costituito da particelle di polvere.

**Saturno** è caratterizzato da uno spettacolare sistema di anelli. La sua distanza dal Sole è circa il doppio rispetto a quella di Giove. Ha, come gli altri pianeti giganti, una bassa densità. Saturno

**Gli anelli di Saturno** furono intravisti da G. Galilei (che però non li riconobbe come tali) e studiati dettagliatamente dall'astronomo italiano G.D. Cassini (1625-1712). Essi sono formati da aggregati di particelle estremamente sottili e non da corpi solidi; sono costituiti principalmente da frammenti di ghiaccio d'acqua mescolati con polvere di silicati.

**Si conosce l'esistenza di 18 satelliti di Saturno**, ma è probabile che ce ne siano altri. Si distinguono in satelliti regolari, con orbita quasi circolare sul piano equatoriale del pianeta, e in satelliti irregolari. Titano è il più grande (maggiore di Mercurio) e luminoso; si presenta avvolto in una densa atmosfera formata da azoto e metano, che impedisce l'osservazione della superficie.

Urano

**Urano** fu scoperto casualmente nel 1781 da F.W. Herschel (1738-1822). È un pianeta gigante, come Giove, Saturno e Nettuno, ma a differenza di questi non ha apprezzabili sorgenti interne di calore. Caratteristica del pianeta è il grande valore dell'inclinazione dell'asse di rotazione sul piano orbitale, per cui volge al Sole per lunghi periodi o l'uno o l'altro polo. Lo strato superiore della sua atmosfera, composta prevalentemente da idrogeno ed elio, è di colore verde-azzurro.

Nettuno

**Nettuno** fu scoperto nel 1846 dall'astronomo tedesco J.G. Galle (1812-1910) sulla base di previsioni teoriche, formulate indipendentemente l'uno dall'altro dall'inglese J.C. Adams (1819-92) e dal francese U. Le Verrier (1811-77), che avevano analizzato le perturbazioni dell'orbita di Urano.

Al telescopio il pianeta ha l'aspetto di un piccolo disco verdastro, molto simile a Urano. L'atmosfera mostra la presenza di metano. Nulla si conosce sulla sua struttura interna. È circondato da quattro deboli anelli e possiede due satelliti: Tritone e Nereide.

Plutone

**Plutone è il pianeta più esterno del sistema solare**, scoperto nel 1930 da C. Tombaugh. Ha l'orbita più inclinata rispetto al piano dell'eclittica e più eccentrica fra tutti i pianeti del sistema solare. La distanza media dal Sole è di 5900 milioni di km. Plutone possiede un satellite, Caronte, di massa e dimensioni simili a Plutone stesso, con il quale forma un pianeta doppio. Il suolo di Plutone è probabilmente coperto da metano ghiacciato (infatti, nel periodo in cui il pianeta è più vicino al Sole, quindi più riscaldato, sviluppa una debole atmosfera di metano).

### ■ La fascia degli asteroidi

Gli asteroidi (o pianetini) sono piccoli corpi rocciosi di forma irregolare, residui delle prime fasi della storia del siste-

ma solare, che ruotano intorno al Sole su orbite per lo più intermedie tra quella di Marte e quella di Giove; la maggior parte non supera qualche decina di km di diametro, mentre una trentina circa ha un diametro maggiore di 200 km.

Due gruppi di pianetini, detti Troiani, descrivono quasi la stessa orbita di Giove e restano sempre a un'uguale distanza dal pianeta e dal Sole. Altri descrivono ellissi molto allungate e si spingono verso i limiti del sistema planetario. Sembra probabile l'ipotesi che essi si siano originati dalla nube primordiale di gas che ha formato il sistema solare; in seguito, **non sarebbero riusciti a raccogliersi in un unico corpo a causa delle forti perturbazioni generate dalla forza gravitazionale del pianeta Giove**. Gli asteroidi vengono classificati in vari tipi a seconda degli elementi chimici più abbondanti sulla loro superficie (carbonacei, silicacei e metallici).

Al primo asteroide, scoperto nel 1801, se ne sono aggiunte molte migliaia e di circa 2000 è stata determinata l'orbita.

### 3.4 La Luna

La Luna, unico satellite naturale della Terra, ci appare in cielo come un disco con diametro circa uguale a quello del Sole, equivalente a circa  $1/4$  di quello della Terra (tab. 3.3).

#### ■ Origine della Luna

Sull'origine del nostro satellite sono state ipotizzate varie teorie; di esse, alcune hanno perso credibilità con il passare del tempo, altre sono state perfezionate con l'aumentare dei dati a nostra disposizione.

Secondo la **teoria della separazione**, in origine la Terra era un corpo fluido, che ruotava su se stesso con una velocità superiore a quella attuale. Questa circostanza avrebbe prodotto sulla Terra una protuberanza, che a un certo momento si staccò formando la Luna. Questa teoria fu abbandonata quando si dimostrò che le resistenze di attrito avrebbero impedito alla protuberanza di raggiungere l'altezza necessaria. Non spiega, inoltre, come mai la Terra ruotasse tanto più velocemente rispetto a oggi e perché il piano dell'orbita lunare sia inclinato rispetto al piano dell'orbita terrestre; con tale teoria si giustificerebbe, però, la minor densità della Luna.

**La Luna può essere considerata come parte di un pianeta doppio** formatosi per accumulo di particelle di materia, cresciuto contemporaneamente alla Terra, anche se più lentamente. Questa teoria è invalidata dalla circostanza per cui i valori della densità della Luna e della Terra sono molto diversi, fatto che indica una composizione complessiva diffe-

Teoria  
della separazione

Teoria  
del pianeta doppio

**Tabella 3.3** Caratteristiche della Luna

distanza dalla Terra, da centro a centro	media	384 400 km;
	minima (perigeo)	356 410 km;
	massima (apogeo)	406 697 km
distanza dalla Terra, da superficie a superficie	media	376 284 km;
	minima	348 294 km;
	massima	398 581 km
periodo di rivoluzione	27,321 661 giorni	
periodo di rotazione sul proprio asse	27,321 661 giorni	
mese sinodico	29g 12h 44m 2,9s	
velocità orbitale media	3680 km/h	
inclinazione assiale del piano equatoriale, riferita all'eclittica	1°32'	
inclinazione orbitale	5°09'	
eccentricità orbitale	0,0549	
diametro	3475,6 km	
diametro apparente visto dalla Terra	massimo	33'31"
	medio	31'5"
	minimo	29'2"
densità (acqua = 1)	3,342	
massa (Terra = 1)	0,0123	
volume (Terra = 1)	0,0203	
velocità di fuga	2,38 km/s	
gravità alla superficie (Terra = 1)	0,1653	
albedo	0,07	
magnitudine media (alla Luna piena)	- 12,7	

rente, difficile da giustificare ipotizzando l'originaria formazione dallo stesso aggregato materiale.

Teoria della cattura

In base alla **teoria della cattura**, la Luna potrebbe essere un intruso proveniente dal sistema solare, che – giunto in vicinanza della Terra – è stato attratto dal suo campo gravitazionale. L'insieme di circostanze concomitanti necessarie per il verificarsi di questo fenomeno appare poco probabile, anche se questa teoria giustificerebbe la diversa composizione della Luna e della Terra.

Teoria  
dell'accrescimento

Secondo la **teoria dell'accrescimento**, la Luna si sarebbe formata in seguito all'aggregazione di particelle e polveri già orbitanti intorno alla Terra. È l'ipotesi ritenuta più plausibile.

### ■ La superficie della Luna

La materia che costituisce la crosta lunare ha **composizione chimica simile a quella della crosta terrestre** (nelle rocce

lunari portate sulla Terra, tutte di composizione basaltica, sono stati trovati solo tre nuovi minerali).

La **superficie lunare** mostra zone chiare (tradizionalmente chiamate terre, o continenti) e zone scure (chiamate mari). Un'osservazione più attenta mostra grandi catene montuose, numerosi crateri e lunghi solchi.

Le **terre** sono zone più chiare, accidentate e fittamente caratterizzate. Nelle terre ci sono catene montuose (che raggiungono anche 8000 m di altezza) e solchi.

I **mari** sono zone pianeggianti, vaste, scure, lisce e approssimativamente circolari. Si tratta di giganteschi crateri di asteroidi riempiti dalla lava fuoriuscita dagli strati più profondi dopo l'impatto. La genesi di origine vulcanica è stata scartata, poiché i crateri lunari sembrano disposti a caso, mentre solitamente i vulcani terrestri si addensano e si allineano in regioni ben definite; le dimensioni sembrano poi troppo grandi perché vengano considerati edifici vulcanici.

Analizzando il moto dei satelliti messi in orbita intorno alla Luna, si sono rilevate, in corrispondenza dei mari più circolari, anomalie di gravità, espresse da valori più elevati che dimostrano la presenza di **forti concentrazioni di massa, battezzate mascon** (*mass concentration*), probabilmente determinate da grossi meteoriti metallici che hanno originato i mari medesimi.

La Luna **non possiede atmosfera**, che si è dispersa a causa della debole attrazione esercitata sulla materia gassosa dalla gravità lunare. Tale circostanza comporta alcune conseguenze:

- la temperatura della superficie lunare presenta oscillazioni assai pronunciate (di circa 270 °C nell'arco di un giorno lunare, da massimi di 120 °C a minimi di -150 °C durante la notte);
- i fenomeni di erosione sulla superficie lunare sono assenti;
- i fenomeni acustici non possono prodursi;
- osservate dalla Luna, le stelle presentano un aspetto più lucente e puntiforme (la loro immagine non è soggetta a fenomeni di "tremolio", dovuti a movimenti dell'aria).

## ■ La struttura interna

Le informazioni raccolte dalle missioni Apollo e dagli studi con sonde senza equipaggio hanno portato alla definizione di un modello attendibile della struttura interna della Luna. Lo **strato superficiale, formato da sabbia e polvere** (regolite), raggiunge in alcuni punti anche 20 m di spessore. La profondità della **crosta** è in media di 60 km; al di sotto di essa si trova il **mantello**, che si estende a circa 1000 km di

La superficie lunare: "terre" e "mari"

Le mascon



profondità. Procedendo ulteriormente verso l'interno, si incontra una **zona parzialmente fusa (astenosfera)**. La parte più interna è il **nucleo lunare**, presumibilmente del diametro di circa 1000 km, **ricco di ferro, probabilmente allo stato liquido** e con temperature di circa 1500 °C. I sismometri lasciati sul suolo lunare nel corso di differenti missioni hanno registrato terremoti di tipo sia superficiale, sia profondo. Gli eventi sismici sono dovuti alla caduta di meteoriti e a sommovimenti che hanno luogo all'interno della Luna stessa. Questi ultimi sono più frequenti quando la Luna si trova più vicina alla Terra e sono pertanto attribuibili all'azione gravitazionale esercitata dal nostro pianeta.

### ■ I movimenti della Luna

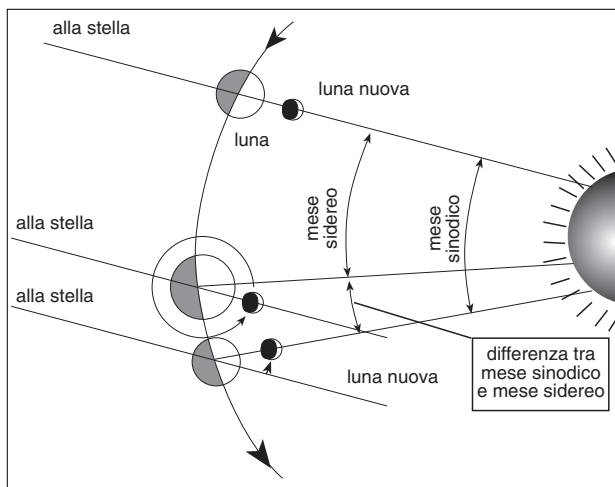
La Luna compie tre movimenti principali: il moto di rivoluzione intorno alla terra, il moto di rotazione intorno al proprio asse e il moto di traslazione, insieme alla Terra, intorno al Sole.

#### Moto di rivoluzione

Il **moto di rivoluzione** si svolge, **in senso antiorario**, lungo un'orbita ellittica (dove la Terra occupa uno dei fuochi dell'ellisse), il cui piano è inclinato di poco più di 5° rispetto al piano dell'orbita terrestre (eclittica). Nel corso di una rivoluzione completa, la Luna interseca il piano dell'eclittica in due punti, detti nodi, la cui congiungente è chiamata **linea dei nodi**. Durante la rivoluzione, la distanza fra la Terra e la Luna varia da un minimo (perigeo) a un massimo (apogeo) e, mediamente, è di circa 384 000 km. Per il calcolo della durata del periodo di rivoluzione della Luna, bisogna distinguere i due casi in cui la posizione del satellite viene riferita a una stella fissa (rivoluzione siderea) oppure all'allineamento Terra-Sole (rivoluzione sinodica). Nel primo caso, il periodo di rivoluzione risulta di 27 giorni, 7 ore, 43 minuti e 12 secondi (mese sidereo); nel secondo, il periodo risulta maggiore di altri due giorni, per la precisione 29 giorni, 12 ore, 44 minuti e 3 secondi (mese sinodico): infatti, mentre la Luna compie la sua orbita, la Terra si sposta lungo l'eclittica di un certo angolo e, affinché la Luna possa presentarsi nella stessa posizione rispetto all'allineamento Terra-Sole (per esempio, nella fase di Luna nuova, vedi oltre), deve, alla scadenza del mese sidereo, percorrere un angolo corrispondente sulla sua orbita (ciò richiede oltre 2 giorni e 12 ore) (fig. 3.2).

#### Moto di rotazione

Il **moto di rotazione** della Luna intorno al proprio asse avviene **nello stesso senso della rotazione terrestre** (cioè da ovest a est) e, ciò che è più interessante, ha la stessa durata (circa 27 giorni e un terzo) del periodo di rivoluzione (siderea) intorno alla Terra; di conseguenza, la Luna volge ver-



**Figura 3.2**  
Relazione fra mese  
sidereo e mese sinodico.

so la Terra sempre la stessa faccia, cioè lo stesso emisfero (il lato nascosto della Luna si è potuto osservare solo grazie alle missioni spaziali).

Il **moto di traslazione** si compie nello stesso senso e con la stessa velocità con cui la Terra effettua il suo moto di rivoluzione intorno al Sole. Rispetto al Sole, la curva descritta dalla Luna non è più un'ellisse, ma una traiettoria complessa detta **epicicloide** (una sorta di ovale sinuoso che taglia l'orbita terrestre in più punti a intervalli regolari).

Moto di traslazione

Altri movimenti della Luna sono le librazioni. Sono leggere oscillazioni (od ondeggiamenti) che subisce la parte visibile della Luna come conseguenza delle caratteristiche dei suoi moti di rotazione e rivoluzione intorno alla Terra: come risultato, la porzione di superficie lunare effettivamente osservabile dal nostro pianeta è superiore al 50% (corrispondente all'emisfero che è sempre rivolto verso la Terra); in effetti, ci è possibile scorgere circa il 58% della superficie lunare. Ciò è dovuto, in particolare, a due circostanze:

Le librazioni

- l'asse di rotazione della Luna è inclinato (di oltre  $6^\circ$ ) rispetto al piano della sua orbita, per cui dalla Terra noi vediamo alternativamente, nel corso della rivoluzione lunare, un po' più del suo emisfero settentrionale e un po' più del suo emisfero meridionale (librazione in latitudine);
- mentre la Luna ruota intorno al proprio asse con velocità uniforme, nel moto di rivoluzione, con traiettoria ellittica, la

velocità al perigeo è maggiore di quella posseduta all'apogeo (2ª legge di Keplero) e ciò permette di "sbirciare" qualcosa in più, sia verso est, sia verso ovest (librazione in longitudine).

### ■ Le fasi lunari

Nel corso della sua rivoluzione intorno alla Terra, la Luna splende di luce solare riflessa e perciò può essere illuminata solo la metà lunare rivolta al Sole; tuttavia, eccetto che per breve tempo nel corso di ogni mese, la metà illuminata non è la stessa che sta di fronte alla Terra, ma cambia ogni giorno, passando, nel corso di circa due settimane, da una condizione di totale oscurità a una condizione di totale illuminazione; nelle due settimane successive avviene il contrario. Questi cambiamenti giornalieri nell'aspetto della Luna, vista da un osservatore terrestre, sono chiamati **fasi lunari** (fig. 3.3).

Luna nuova

Con il termine **Luna nuova** (o **novilunio**) si indica il momento in cui essa si trova in congiunzione, cioè tra il Sole e la Terra. Durante il novilunio la Luna non è visibile, perché ci mostra tutta la metà in ombra; inoltre, sorge e tramonta contemporaneamente al Sole.

Fase crescente

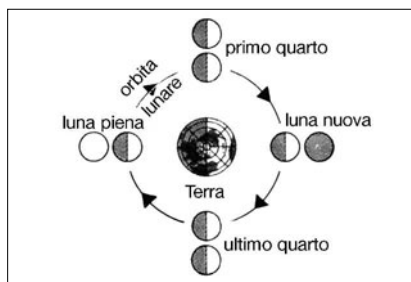
Successivamente entra in **fase crescente**: sulla Terra è visibile dapprima una sottile fascia luminosa a forma di falce, con convessità a ovest ("gobba a ponente"), che si amplia gradualmente fino a raggiungere la fase del **primo quarto**, all'incirca dopo una settimana. Dalla Terra vediamo la metà occidentale della sua faccia illuminata. In questo momento la Luna è a est del Sole, nasce a mezzogiorno e tramonta a mezzanotte.

Luna piena

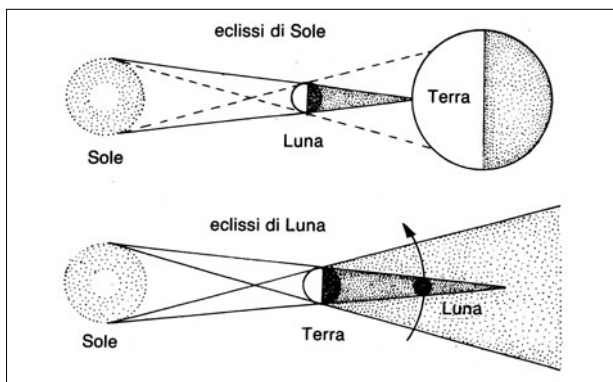
Dopo un'altra settimana è **Luna piena** (o **plenilunio**): ci appare come un disco completamente illuminato ed è situata in opposizione, cioè dalla parte opposta al Sole. Sorge al tramonto e cala all'alba.

Fase calante

Nell'**ultimo quarto** la Luna ci mostra nuovamente una metà del disco illuminato, ma la metà orientale. Si trova a ovest



**Figura 3.3**  
Le fasi lunari.

**Figura 3.4***Eclissi di Sole e di Luna.*

del Sole, nasce a mezzanotte e tramonta a mezzogiorno. Infine, passa per la **fase calante**: la Luna assume la forma di falce sempre più ridotta, ma con convessità verso est ("gobba a levante"), fino a scomparire del tutto alla vista. Si è allora tornati alla fase di Luna nuova e inizia un altro ciclo.

Le fasi di Luna nuova e piena sono dette **sizigie**, quelle del primo e ultimo quarto **quadrature**.

### ■ Eclissi di Sole e di Luna

Quando la Luna, nel suo moto, si interpone tra il Sole e la Terra, in modo tale che si abbia un allineamento Sole-Luna-Terra, il cono d'ombra della Luna investe una parte della superficie terrestre e si verifica un'**eclissi di Sole** (quest'ultimo viene cioè occultato alla vista dalla Terra) (fig. 3.4).

Quando è la Terra a interporre fra il Sole e la Luna, in modo che si abbia un allineamento Sole-Terra-Luna, il cono d'ombra della Terra si proietta sulla Luna e si verifica un'**eclissi di Luna** (la Luna, cioè, viene oscurata).

Le eclissi possono essere totali o parziali: sono **totali**, quando il Sole è interamente coperto dalla Luna, o quando tutta la Luna è oscurata dall'ombra della Terra; sono **parziali**, quando l'allineamento Sole, Luna e Terra non è perfetto, per cui il cono d'ombra della Luna non copre interamente il Sole o quello della Terra non oscura completamente la Luna. La condizione perché si verifichi un'eclissi (di Sole o di Luna) è che la Luna venga a trovarsi in esatta corrispondenza (eclissi totale) o nelle vicinanze (eclissi parziale) di uno dei due nodi: se è in fase di congiunzione (novilunio), si verificherà un'eclissi di Sole; se è in fase di opposizione (plenilunio), si verifica un'eclissi di Luna. Un caso particolare è l'e-

## Eclissi anulare

**clissi anulare**, che avviene quando la Luna è in apogeo e il vertice del suo cono d'ombra non riesce a raggiungere la superficie terrestre. Sul disco solare si vedrà allora, proiettata centralmente, l'ombra della Luna. Poiché il disco lunare ha un diametro inferiore a quello del Sole, esso apparirà circondato da un anello brillante.

## ■ Le maree

**Le maree sono movimenti periodici di innalzamento (flusso) e abbassamento (riflusso) del livello marino**, causati dall'attrazione combinata della Luna e del Sole sulla Terra (l'azione della Luna è circa 2,2 volte maggiore di quella del Sole; vedi anche riquadro).

La massima altezza raggiunta dal livello del mare prende il nome di **alta marea**, mentre il massimo abbassamento di li-

### PERCHÉ SI VERIFICANO LE MAREE

La spiegazione del fenomeno delle maree è legata alla legge di gravitazione universale, che afferma che due corpi si attraggono con una forza che è direttamente proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. L'analisi, basata sulla teoria statica delle maree proposta da I. Newton, è molto schematizzata e spiega solo le caratteristiche principali del complesso fenomeno delle maree.

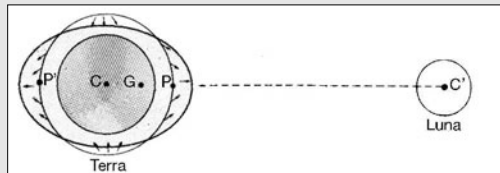
Si considerino sulla Terra, coperta da uno strato uniforme di acqua, due punti opposti, P e P', e che Terra e Luna siano costituenti di uno stesso sistema, che ruota attorno al Sole rispetto a un asse immaginario passante per il baricentro (posizionato in G dalla stessa parte della Luna): questo moto genera una forza centrifuga, tanto maggiore quanto più ci si allontana dall'asse di rotazione (figura sotto).

Le forze in gioco sono l'**attrazione gravitazionale** e la **forza centrifuga**. I punti del

meridiano su cui transita la Luna sono soggetti a un'attrazione gravitazionale elevata (perché la Luna è più vicina) e a una forza centrifuga di minore entità (baricentro vicino): le due forze si sommano, provocando un innalzamento delle acque (P). Dalla parte opposta, invece, l'attrazione lunare è minore, perché la Luna è più lontana, ma la forza centrifuga è molto grande e la somma delle due forze determina ancora un sollevamento delle acque (P').

Nei punti posti a 90° rispetto all'allineamento Terra-Luna, la somma delle forze in gioco dà, invece, una forza diretta verso il centro della Terra, che determina una bassa marea.

Sul sistema Terra-Luna considerato fino a ora agisce anche la forza gravitazionale operata dal Sole. Se Luna e Sole, a causa dei loro moti, si vengono a trovare allineati dalla stessa parte rispetto alla Terra, oppure c'è allineamento Luna-Terra-Sole, la forza gravitazionale dovuta alle due masse sarà ancora più pronunciata (marea viva). Se, invece, Sole e Luna formano con la Terra 90° (primo e ultimo quarto), l'attrazione solare annulla in parte quella lunare e perciò le maree hanno un'ampiezza minima (marea morta).



## GLOSSARIO

**Afelio**

Posizione più distante dal Sole occupata sull'orbita ellittica da un pianeta o da un altro corpo del sistema solare.

**Astronomia**

È la scienza che si occupa dello studio degli astri e dei fenomeni celesti.

**Baricentro**

È il punto (detto anche centro di gravità o centro di massa) nel quale si può immaginare concentrata tutta la massa di un corpo o di un sistema.

**Datazione radioattiva**

Metodo di valutazione dell'età di una roccia, o di un fenomeno geologico, che si effettua misurando la concentrazione di elementi radioattivi.

**Ellisse**

Luogo dei punti del piano le cui distanze da due punti fissi, detti fuochi, hanno somma costante.

**Ellissoide**

Solido che si ottiene facendo ruotare un'ellisse intorno a uno dei suoi assi.

**Forza centripeta**

Forza che attrae i corpi verso il centro. Nel caso dei corpi attratti dalla Terra coincide con la forza di gravità.

**Forza centrifuga**

Agisce dall'interno verso l'esterno. Nel caso di oggetti sulla Terra è dovuta alla rotazione terrestre.

**Moto convettivo**

È una forma di propagazione di materiale e calore in un corpo mediante trasferimento di materia da un punto all'altro di esso. Può verificarsi solo nei fluidi (liquidi e gas), in quanto esclusivamente in essi le particelle possono muoversi più o meno liberamente.

**Perielio**

Posizione più vicina al Sole occupata sull'orbita ellittica da un pianeta o da un altro corpo del sistema solare.

**Radiazione**

Energia emessa da una sorgente, che viaggia sotto forma di onde o di particelle usando come mezzo l'aria o il vuoto. Il termine è in genere riferito alla radiazione elettromagnetica (onde radio, infrarossi, luce visibile, raggi X).

**Satellite**

Corpo celeste che ruota attorno a un pianeta, seguendo nella sua rivoluzione intorno alla stella del sistema. Satellite artificiale è il veicolo ideato e costruito dall'uomo per essere posto in orbita intorno alla Terra o a un altro corpo celeste.

**Sonda**

Strumento atto a esplorare un luogo non raggiungibile direttamente. Una sonda spaziale è un oggetto lanciato nello spazio per raccogliere informazioni su corpi celesti.

vello è detto **bassa marea**. Fra questi due estremi è calcolata l'ampiezza di marea, modesta nei mari chiusi (1-2 m), più ampia negli oceani (per esempio, 15 m lungo le coste dell'Europa atlantica, 20 m nella baia di Fundy, in Canada).

Per la combinazione del moto rotatorio della Terra intorno al proprio asse e del moto orbitale della Luna, quest'ultima impiega 24 ore e 50 minuti a compiere un giro completo intorno alla Terra. Di conseguenza, in ogni punto delle superfici marine dovrebbero, in media, alternarsi teoricamente un flusso e un riflusso ogni 6 ore, 12 minuti, 30 secondi, cioè **due alte maree** e **due basse maree** nell'arco di 24 ore e 50 minuti.

Ora di porto

In pratica, il movimento delle maree non può verificarsi in modo regolare per una serie di motivi, tra cui, principalmente, la distribuzione irregolare degli oceani, l'inerzia delle acque, l'attrito esercitato su di esse dal fondo marino e la natura frastagliata delle coste. Tutto ciò provoca un ritardo nella propagazione del flusso (e del riflusso) e quindi nel raggiungimento del livello di alta marea (o bassa marea). Questo ritardo, variabile da luogo a luogo, viene chiamato **ora di porto**. Le linee che su una carta congiungono i punti delle coste in cui l'alta marea si verifica contemporaneamente sono chiamate **linee cotidali**.

## TEST DI VERIFICA

**1 Il pianeta del sistema solare più lontano dal Sole è:**

- a Giove;
- b Nettuno;
- c Mercurio;
- d Plutone.

**2 Quale tra i seguenti corpi celesti non appartiene al sistema solare:**

- a Venere;
- b Luna;
- c cometa;
- d asteroide.

**3 Le macchie solari sono tipiche:**

- a della fotosfera;
- b della corona solare;
- c della cromosfera;
- d del nucleo.

**4 La fase di novilunio indica il momento in cui Sole, Luna e Terra sono:**

- a in congiunzione;
- b in opposizione;
- c in quadratura;
- d nessuna delle precedenti.

**5 La teoria copernicana rispetto a quella geocentrica fu considerata rivoluzionaria in quanto afferma che:**

- a i pianeti percorrono orbite ellittiche intorno al Sole;
- b il sistema solare è formato da nove pianeti;
- c il Sole si trova al centro del sistema solare;
- d il sistema solare appartiene alla Via Lattea;
- e la Terra riflette la luce del Sole.

R

1 d; 2 d; 3 a; 4 a; 5 a.

# 4 L'origine dell'universo

---

L'universo è costituito da **galassie**: una fra le tante è la Via Lattea, di cui fa parte il sistema solare. Le galassie, a loro volta riunite in piccoli **gruppi** e grandi **ammassi**, sono sistemi formati da centinaia di miliardi di stelle e da materia cosmica diffusa negli spazi interstellari. La natura e le modalità di formazione di questi giganteschi oggetti celesti sono studiati dalla **cosmologia**, la scienza che si occupa dell'origine, dell'evoluzione e della struttura dell'universo. Secondo la teoria cosmologica attualmente ritenuta più valida, **la teoria del big bang**, l'universo avrebbe tratto origine in una "grande esplosione" a partire da un punto iniziale in cui erano concentrate la sua materia e la sua energia. La materia, proiettata nello spazio, si sarebbe via via aggregata e separata in nubi di gas in espansione, nuclei delle future galassie. In seguito, all'interno di queste ultime si sarebbero formati, per collasso gravitazionale della materia gassosa, agglomerati di stelle.

## 4.1 Le galassie

Il sistema solare e le stelle visibili nella volta celeste fanno parte di un unico sistema, che costituisce una **galassia** denominata Via Lattea (il termine galassia deriva dal greco *gala*, latte). Una **galassia** è un **agglomerato di stelle, gas e polveri** (nubi di materia oscura interstellare), **legati tra loro dalla forza di gravità e orbitanti intorno a un punto centrale**. Fino a un centinaio di anni fa, gli astronomi ritenevano che la Via Lattea (o Galassia) fosse l'unica esistente ed esaurisse l'intero universo. Oggi, grazie all'impiego di strumenti di indagine sempre più perfezionati, sappiamo che la Via Lattea, nonostante la sua enorme estensione (circa 100 000 anni luce), non è che una fra centinaia di miliardi di altre galassie che popolano l'universo, di cui costituiscono le unità strutturali.

Che cos'è una galassia

Le galassie sono in genere riunite in piccoli **gruppi** (che ne contengono alcune decine; la Via Lattea è tra queste) o in grandi **ammassi** (che ne contengono centinaia e anche migliaia); gruppi e ammassi fanno a loro volta parte di assembramenti ancora più vasti, detti superammassi.

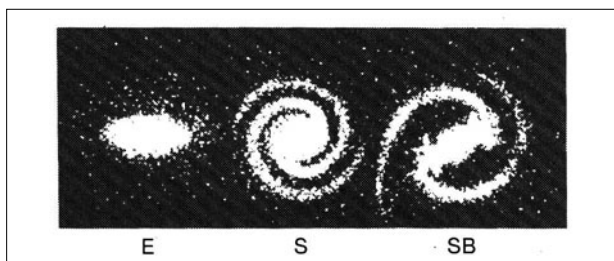
Gruppi e ammassi

### ■ Classificazione delle galassie

La classificazione delle galassie oggi adottata si basa su quella introdotta dall'astronomo americano E. Hubble (1924) e



**Figura 4.1**  
*Tipi di galassie.*



sottoposta a revisione nel 1961 dall'astronomo americano A. Sandage (fig. 4.1).

A seconda della loro forma, le galassie sono suddivise in:

Galassie ellittiche (E) ● **galassie ellittiche** (E), la cui forma è riconducibile a quella di un ellissoide di rotazione; come indica la loro luminosità, che decresce dal centro verso la periferia, in esse la maggior parte delle stelle si trova addensata intorno al centro della galassia e non hanno praticamente nubi di gas e polveri. A seconda della loro forma più o meno appiattita, esse sono ulteriormente suddivise in 8 sottogruppi, (da E0 a E7: il numero indica l'appiattimento crescente);

Galassie a spirale (S) ● **galassie a spirale** (S), di forma discoidale, simili a grandi girandole luminose, in cui, da un brillante nucleo centrale si dipartono lunghi bracci a spirale. In esse si alternano regioni luminose, dovute a un maggior addensamento di stelle, e regioni oscure, in cui sono presenti nubi di gas e polveri. Sono ulteriormente suddivise in tre sottogruppi, distinti dalle lettere a, b, c (Sa, Sb e Sc), con cui si indicano le differenti dimensioni del nucleo (molto pronunciate in a, trascurabili in c). La Via Lattea si può collocare nella sotto-classe Sb;

Galassie a spirale barrata (SB) ● **galassie a spirale barrata** (SB), con nucleo a forma di barra, dai cui estremi partono i bracci. Anche queste galassie si suddividono in tre sottogruppi (SBa, SBb e SBc) con criteri analoghi a quelli delle spirali normali;

Galassie irregolari (Ir) ● **galassie irregolari** (Ir), di forma non ben definita, con massa e luminosità in genere ridotte. Gli esempi più noti sono la Grande e la Piccola Nube di Magellano.

### ■ La Via Lattea

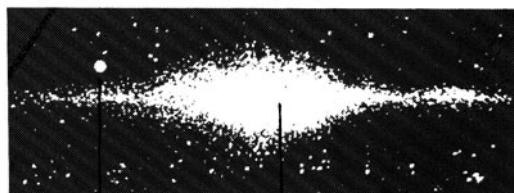
Il nome Via Lattea deriva dal fatto che, nel cielo notturno, essa appare come una fascia biancastra e debolmente luminosa che attraversa il cielo. È una **galassia a spirale contenente oltre 100 miliardi di stelle**, con sottili bracci di materia ruotanti lentamente attorno a un nucleo centrale ri-

gonfio (con diametro di circa 10 000 anni luce), contornato da un **alone** di vecchie stelle e di ammassi globulari di stelle. Il **diametro massimo della Galassia è di 100 000 anni luce** e lo **spessore medio è di circa 1700 anni luce** (fig. 4.2). Le stelle (di cui appena 6000 visibili a occhio nudo) sono più fitte nel centro e più rade alla periferia dei bracci, immerse in nubi di gas e polveri interstellari, localmente concentrate in nebulose.

Gli astronomi classificano le stelle della Via Lattea in due categorie principali (o popolazioni):

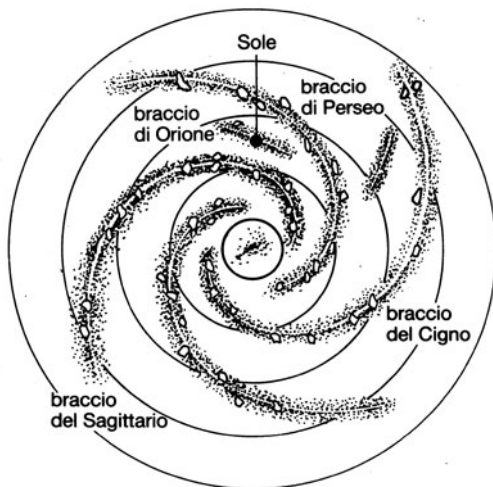
● **popolazione I**, costituita da stelle giovani, caratteristiche del disco galattico, la cui composizione chimica è ricca in elementi pesanti; Popolazione I

● **popolazione II**, formata da stelle più vecchie, presenti soprattutto nell'alone galattico; la loro composizione chimica Popolazione II



Sole

nucleo

**Figura 4.2**

La Galassia, o Via Lattea.

Il centro  
della Via Lattea

è più povera di elementi pesanti (che per gli astronomi sono tutti gli elementi più pesanti dell'elio).

Il **centro della Via Lattea** si trova circa a 28 000 anni luce dal Sole, in direzione della costellazione del Sagittario (v. riquadro). Si tratta di una regione nascosta al nostro sguardo da dense nubi di gas e di polveri interstellari oscure, che assorbono quasi completamente la radiazione luminosa; ci giungono, invece, segnali nel campo delle onde radio.

La posizione del Sole

All'inizio del XX secolo si credeva ancora che il Sole occupasse il centro della Galassia. Solo nel 1918 l'astronomo americano H. Shapley (1885-1972) stabilì la collocazione periferica del Sole e del sistema solare. Cercando di misurare la posizione e la distanza degli ammassi globulari, egli aveva osservato che la maggior parte era concentrata in una zona di cielo piuttosto lontana dal Sole, e precisamente in direzione della costellazione del Sagittario. Gli ammassi globulari stavano infatti muovendosi intorno al centro della Galassia, il quale certamente non coincideva con il sistema solare. Shapley riuscì a determinare in modo esatto e indiscusso la posizione del Sole nella Via Lattea: in uno dei bracci a spirale, a circa 28 000 anni luce dal centro.

## 4.2 Origine ed evoluzione dell'universo

La **cosmologia** è la scienza che si occupa dello studio dell'origine e dell'evoluzione dell'universo e della possibile esi-

### IL GRUPPO LOCALE

La **Via Lattea** fa parte del Gruppo Locale, formato da una ventina di galassie di cui tre, più grandi, a spirale (la Via Lattea stessa, la galassia di Andromeda, visibile a occhio nudo, e la galassia del Triangolo) e le altre molto più piccole, del tipo ellittico o irregolare (come la Piccola e la Grande Nube di Magellano, entrambe visibili a occhio nudo dall'emisfero sud).

La **galassia a spirale di Andromeda**, distante circa 2 milioni di anni luce da noi, può essere considerata la gemella della Via Lattea; è anch'essa molto luminosa (circa 300 miliardi di volte più del Sole).

La **galassia a spirale del Triangolo**, distante circa 2 milioni di anni luce, è molto più piccola della nebulosa di Andromeda e della Via Lattea.

La **Grande Nube di Magellano** è quattro volte meno luminosa della Via Lattea, ha un diametro di 25 000 anni luce ed è distante dalla Terra circa 150 000 anni luce.

La **Piccola Nube di Magellano**, invece, ha una luminosità pari a un ventesimo di quella della Via Lattea, ed è più distante, circa 200 000 anni luce.

Le Nubi di Magellano, interagendo gravitazionalmente con la Via Lattea, ne modificano il profilo periferico, mentre la nostra Galassia strappa alle Nubi un flusso di gas prevalentemente costituito da idrogeno. Questo fenomeno è denominato corrente magellanica e forma una sorta di ponte di materia sullo spazio che separa i suddetti ammassi stellari.

stenza di molti universi, problemi di cui gli uomini si sono sempre occupati, dalle prime civiltà fino a oggi, trovando risposte diverse nel corso dei secoli, basate sulle conoscenze dell'epoca.

## ■ Origine dell'universo

Per ricostruire il passato dell'universo, è utile partire dalle conoscenze attuali, immaginando un percorso a ritroso nel tempo.

Nel 1929 le misurazioni eseguite dall'astronomo americano E.P. Hubble (1889-1953), indicarono uno **spostamento verso il rosso** (*red shift*) delle **righe spettrali delle galassie** (v. riquadro a p. 60): questo fenomeno indica che tutte le **galassie si stanno allontanando** e, dunque, che **l'universo è in espansione**; Hubble dimostrò anche che la velocità di allontanamento delle galassie è proporzionale alla loro distanza dalla Via Lattea. Pensando al passato, si deve immaginare un universo sempre più piccolo, fino a un momento lontanissimo in cui esso era enormemente contratto e tutta l'energia e la massa dell'universo erano "condensate" in una piccolissima massa di densità enorme (**atomo primordiale**), ipotesi formulata per la prima volta nel 1927 dall'astronomo belga G.H. Lemaître (1894-1966).

Fu il fisico russo G. Gamow (1904-1968) che nel 1946 usò per primo il termine **big bang** per indicare la "**grande esplosione**" dell'**"atomo" primordiale**, le cui conseguenze sono ancora oggi evidenti attraverso l'espansione dell'universo (teoria del big-bang, o dell'universo in espansione). Secondo Gamow, l'universo primitivo era non soltanto denso, ma anche molto caldo e le reazioni nucleari nei primissimi istanti dell'evoluzione avrebbero potuto produrre tutti gli elementi chimici. L'espansione successiva ne ha provocato il raffreddamento. Le leggi della termodinamica, inoltre, ci permettono di dedurre che in passato l'universo era più concentrato e più caldo rispetto a oggi ("palla di fuoco"); solo dopo un milione di anni dal big bang si sono formati i primi atomi, che, a causa della forza gravitazionale, si sono aggregati in materia.

**Una prova dell'iniziale grande esplosione** (che secondo alcune stime sarebbe avvenuta circa 15 miliardi di anni fa), si ebbe nel 1965, quando due fisici americani, A.A. Penzias (1933) e R. Woodrow Wilson (1936), studiando le radio onde di provenienza cosmica, riuscirono a captare una debole radiazione (**radiazione cosmica di fondo, o radiazione fossile**), proveniente con la stessa intensità da tutte le direzioni dello spazio, che essi interpretarono come l'eco attuale del big bang.

L'universo  
è in espansione

La teoria  
del big bang

La "radiazione  
fossile"

## ■ Evoluzione dell'universo

A causa della "spinta" iniziale ricevuta dal big bang, l'universo è in espansione; esso, tuttavia, è soggetto anche alla forza di gravità, che ne causa la decelerazione, il cui valore dipende sia dalla quantità di materia presente nell'universo, sia dall'impulso ricevuto dalla grande esplosione iniziale. Non essendo attualmente nota l'entità di questi due fattori, gli astronomi ipotizzano per l'evoluzione futura dell'universo due diverse teorie (o modelli).

Teorie dell'universo  
chiuso e  
dell'universo aperto

Secondo la **teoria dell'universo chiuso**, dopo un periodo di espansione, l'universo dovrebbe nuovamente contrarsi, fino a ridursi alla massa piccolissima di densità elevata presente al momento del big bang.

Secondo la **teoria dell'universo aperto**, l'universo dovrebbe continuare a espandersi indefinitamente.

Le due teorie sono oggi ugualmente attendibili, poiché non si dispone ancora di dati sperimentali a sostegno dell'una o dell'altra. Infatti, rimangono tuttora irrisolti alcuni problemi, che vogliamo qui solo ricordare, senza entrare in analisi particolareggiate, specifico campo d'indagine della fisica:

- non è noto il valore della decelerazione dell'universo;

### EFFETTO DOPPLER-RED SHIFT

L'effetto Doppler, comune a tutte le onde, fu scoperto per la prima volta dal fisico tedesco C. Doppler (1803-1853) per le onde sonore. Esso consiste in un cambiamento della frequenza (numero di oscillazioni al secondo) di un'onda, rilevato quando la sorgente dell'onda e un osservatore sono in movimento l'una rispetto all'altro. La frequenza aumenta quando c'è avvicinamento (in quanto si osservano più onde nell'unità di tempo), mentre diminuisce nel caso di allontanamento (si osservano meno onde): per questo il fischio del treno è più acuto quando il mezzo si avvicina all'osservatore. L'effetto Doppler si manifesta per qualsiasi fenomeno ondulatorio e anche per la luce, provocando in questo caso variazioni di colore. La luce di una stella che si avvicina a noi ha una frequenza più elevata e si osserva quindi uno spostamento verso il violetto dello spettro luminoso (*blue shift*); la luce di una stella in allontanamento ha una frequenza mino-

re e a essa corrisponde uno spostamento verso il rosso dello spettro (*red shift*). La luce delle galassie è costituita da un insieme di lunghezze d'onda (tipiche degli elementi più abbondanti che le costituiscono), che si presentano all'analisi mediante spettroscopio come una successione disordinata di "righe" luminose separate fra loro, di colori diversi, dette spettri. Gli spettri delle galassie manifestano una proprietà particolare: le righe appaiono spostate rispetto alla posizione che avrebbero gli stessi elementi considerati in laboratorio; lo spostamento è sempre verso la regione rossa dello spettro (segno che le galassie si stanno allontanando, in accordo con l'effetto Doppler) ed è tanto maggiore quanto più piccola e lontana è la galassia. Misurando le distanze, si trova che lo spostamento verso il rosso è proporzionale alla distanza. Tutte le galassie si allontanano da noi, con velocità tanto più alta quanto più sono lontane (legge di Hubble).

- sono ancora incerte le stime della densità media dell'universo;
- si pone il problema della “massa mancante”, poiché, in base alle osservazioni attuali, la quantità di materia presente nella Via Lattea non sarebbe sufficiente a tenere legati gravitazionalmente i corpi celesti che la compongono.

## GLOSSARIO

**Big bang**

Nome con il quale è comunemente nota la teoria cosmologica secondo cui l'universo si sarebbe originato attraverso una “grande esplosione”, in seguito alla quale sarebbe immediatamente iniziata l'espansione che continua tuttora.

**Galassia**

Sistema costituito da miliardi di stelle. In particolare, il termine Galassia, usato come nome proprio, indica il sistema di cui fa parte il Sole, detto anche Via Lattea.

**Gruppo Locale**

Denominazione del gruppo, di circa 30 galassie, di cui fa parte la Via Lattea.

lassie, di cui fa parte la Via Lattea.

**Radiazione**

Energia che viaggia sotto forma di onde o particelle. Il termine è in genere riferito alla radiazione elettromagnetica (onde radio, raggi infrarossi, luce visibile, raggi ultravioletti, raggi X). **Radiazione cosmica** è il flusso di energia sotto forma di onde e di particelle elementari che investono la Terra provenendo dagli spazi interstellari, intergalattici e dal Sole. La maggior parte delle radiazioni cosmiche è intercettata dall'atmosfera e non arriva alla superficie terrestre.

## TEST DI VERIFICA

**1 Che cos'è la radiazione fossile?**

**2 Descrivete i vari tipi di galassie.**

**3 Che cos'è il Gruppo Locale?**

**4 Qual è il significato del redshift?**

**R** 1 v a p. 59; 2 v a p. 56; 3 v a p. 58; 4 v a p. 60.

# 5 Il pianeta Terra

---

*La Terra non è una sfera perfetta, ma è leggermente schiacciata ai poli e rigonfia all'equatore: la figura che meglio la rappresenta è il **geoide**. Essa compie due movimenti principali, di **rotazione** e **rivoluzione**, che, insieme all'inclinazione del suo asse, sono responsabili dell'**alternarsi** del **di** e della **notte**, della loro **diversa durata** nei vari periodi dell'anno, del succedersi delle **stagioni** e della **presenza** sul pianeta delle **zone climatiche astronomiche**.*

## 5.1 La forma della Terra

Le prove della  
sfericità della Terra

Già alcuni secoli prima di Cristo i pensatori greci erano giunti alla conclusione che la Terra, contrariamente a un'opinione allora comune, non era piatta, ma aveva forma sferica. Varie sono le **prove** indirette a favore della **sfericità della Terra**; tra queste ne segnaliamo due.

Guardando una nave che prende il largo, questa sembra affondare, cioè scomparire prima lo scafo e infine le vele; se la Terra fosse piatta, si osserverebbe che la nave, allontanandosi, diventa sempre più piccola, ma comunque la si vedrebbe sempre tutta intera.

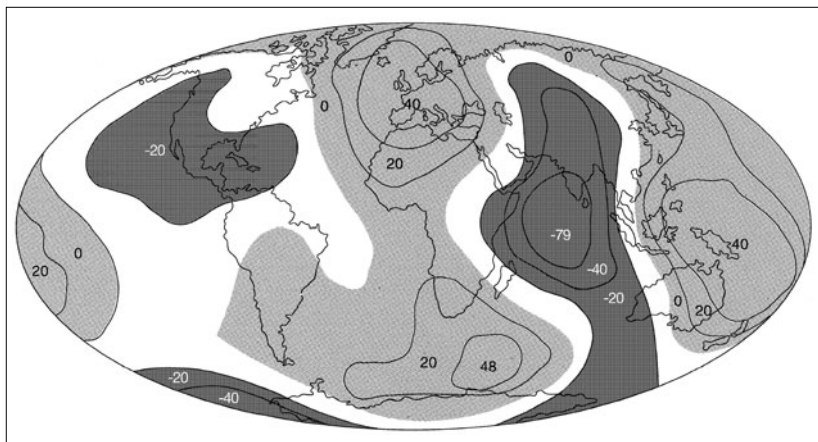
Un'altra prova della sfericità della Terra si basa sull'osservazione delle stelle. Supponiamo che due osservatori, in luoghi diversi del pianeta, osservino alla stessa ora una stessa stella: se la Terra fosse piana, l'astro apparirebbe alla stessa altezza sull'orizzonte; invece, a causa della curvatura della superficie terrestre, la sua posizione viene valutata ad altezze diverse in funzione della latitudine a cui si trovano gli osservatori.

L'ellissoide  
di rotazione

In realtà, la Terra non è perfettamente sferica, ma presenta un sensibile rigonfiamento lungo la fascia equatoriale e uno schiacciamento in corrispondenza delle regioni polari (si tratta comunque di uno schiacciamento minimo: il raggio equatoriale supera quello polare di circa 21 km); possiamo in prima approssimazione paragonare la forma della Terra a quella di un **ellissoide di rotazione**, solido che si genera facendo ruotare un'ellisse attorno al suo asse minore.

Il geoide

Abbiamo detto in prima approssimazione perché, in effetti, a causa della disomogenea distribuzione del materiale all'interno della Terra e della presenza di rilievi e depressioni sulla sua superficie, non si può ricondurre con precisione la sua forma a un ellissoide, bensì a un **geoide**, cioè a un soli-



do ideale in cui la superficie è perpendicolare in ogni suo punto alla direzione del filo a piombo (se la Terra fosse costituita da materiali omogenei, l'ellissoide e il geoide dovrebbero coincidere); rispetto all'ellissoide di riferimento, il geoide non si discosta, comunque, in nessun punto per una distanza maggiore di 200 m (fig. 5.1).

**Figura 5.1**

*La forma della Terra: il geoide e l'ellissoide non coincidono perfettamente (le aree grigio chiaro rappresentano le elevazioni del geoide rispetto all'ellissoide; le aree grigio scuro, le depressioni), ma in nessun punto si discostano per più di 200 m.*

## 5.2 Le dimensioni della Terra

Fin dall'antichità si cercarono di determinare le dimensioni del nostro pianeta ricorrendo a metodi semplici, che condussero comunque a risultati molto vicini a quelli ottenuti più recentemente con l'uso di strumenti assai sofisticati.

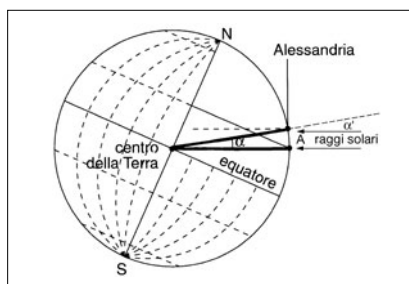
**La misura della circonferenza della Terra è stata rilevata abbastanza esattamente nel 240 a.C. dal grande geografo greco Eratostene di Cirene**, utilizzando alcune informazioni e qualche formula di geometria.

Eratostene venne a conoscenza del fatto che nella città di Siene (in Egitto, oggi Assuan) esisteva un pozzo, nel fondo del quale una volta all'anno, il 21 giugno, a mezzogiorno si specchiava il Sole (ciò significava che in quel particolare momento il Sole era sulla verticale del luogo).

Invece, ad Alessandria, che si trovava a nord di Siene, nello stesso giorno e nella stessa ora il Sole risultava inclinato rispetto alla verticale del luogo. Eratostene misurò ad Alessandria la distanza angolare del Sole dallo zenit (cioè l'angolo  $\alpha$  fra la direzione del sole e la verticale) e trovò che era un cinquantesimo di angolo giro ( $360^\circ$ ), cioè poco più di  $7^\circ$ ,

Come Eratostene misurò la circonferenza della Terra





**Figura 5.2**  
Metodo usato da Eratostene per determinare la misura della circonferenza terrestre.

valore che corrisponde anche alla distanza angolare,  $\alpha'$ , tra Alessandria e Siene (fig. 5.2). Conoscendo la distanza lineare tra le due città, circa 5000 stadi, con una semplice proporzione ( $360^\circ : \alpha = \text{circonferenza terrestre} : \text{distanza Alessandria-Siene}$ ), stabilì quindi che la Terra dovesse essere una sfera con una circonferenza di circa 257 mila stadi, corrispondenti a 39 375 km.

Se consideriamo che il **valore reale della circonferenza terrestre lungo un meridiano**, misurato oggi con tecniche estremamente sofisticate e precise, è **pari a 40 009 km**, possiamo ritenere più che accettabile il risultato ottenuto da Eratostene.

Grazie a strumenti assai perfezionati, montati a bordo di satelliti artificiali in orbita intorno alla Terra, si sono ottenute misure molto precise delle caratteristiche del nostro pianeta (tab. 5.1).

**Tabella 5.1** La Terra in cifre

raggio	equatoriale ( $R_e$ )	6378 km
	polare ( $R_p$ )	6357 km
massa		$5,98 \times 10^{27}$ g
volume		$1,083 \times 10^{27}$ cm <sup>3</sup>
densità		5,52 g/cm <sup>3</sup>
gravità superficiale		9,8 m/s <sup>2</sup>
velocità di fuga		11,2 km/s
schacciamento $[(R_e - R_p) / R_e]$		0,0034
superficie totale		$5,1 \times 10^8$ km <sup>2</sup>
superficie delle terre emerse		$1,49 \times 10^8$ km <sup>2</sup>
superficie degli oceani		$3,61 \times 10^8$ km <sup>2</sup>
altitudine media delle terre emerse		840 m
profondità media degli oceani		3900 m

## 5.3 L'orientamento

Orientarsi significa letteralmente “trovare l'oriente”, cioè il punto in cui nasce il Sole (dal latino *oriri*, nascere) e, in senso più ampio, sapere in quale direzione spostarsi per raggiungere un determinato luogo. Le tecniche d'orientamento più semplici consistono nell'individuare punti di riferimento identificabili in qualsiasi località, in modo da non perdersi neppure in luoghi completamente sconosciuti. Questi punti di riferimento, utilizzati fin dall'antichità, sono i quattro **punti cardinali** (**Nord**, **Sud**, **Est** e **Ovest**), individuati sulla linea dell'**orizzonte**, cioè la linea lungo la quale la Terra e il mare sembrano incontrare il cielo; l'**Est** (E) è il punto da cui sorge il Sole, il **Sud** (S) si trova nella direzione del Sole a mezzogiorno, cioè quando il Sole è più alto nel cielo, l'**Ovest** (O o W) è quello in cui il Sole tramonta, e il **Nord** (N) nella direzione opposta al Sud o, comunque, in quella della Stella Polare. Più precisamente, l'Est e l'Ovest corrispondono ai due punti sulla linea dell'orizzonte in cui il Sole, rispettivamente, sorge e tramonta nei giorni degli equinozi (v. par. 5.6). Le direzioni Nord-Sud ed Est-Ovest sono tra loro perpendicolari, per cui, individuato un solo punto cardinale, è possibile determinare facilmente la posizione degli altri tre.

I punti cardinali

### ■ Orientarsi con la bussola

La bussola è uno strumento costituito da un quadrante, su cui sono evidenziati i quattro punti cardinali e altri punti intermedi (N-E, N-O, S-E ecc., che nel loro insieme costituiscono la **rosa dei venti**), e da un **ago di acciaio calamitato**, girevole su un perno centrale che lo sostiene, che ha la proprietà di allinearsi al campo magnetico terrestre secondo la direzione N-S e di indicare dunque, con una delle sue punte, la **direzione del nord magnetico del nostro pianeta**. Una volta individuato il Nord, il Sud si trova dalla parte opposta, l'Est alla nostra destra e l'Ovest alla nostra sinistra.

### ■ Orientarsi con il Sole

È possibile orientarsi con il Sole seguendo il moto apparente che esso compie nel cielo, descrivendo un arco dall'alba al tramonto. Il punto in cui sorge il Sole indica l'Est e quello in cui tramonta l'Ovest.

**Per trovare il Sud per mezzo del Sole** a qualsiasi ora del giorno, si può utilizzare un orologio con le lancette: si dispone l'orologio in piano con il quadrante verso l'alto; l'orologio verrà poi fatto ruotare finché la lancetta delle ore punti verso il Sole. Tenendo l'orologio in questa posizione,

Come trovare il Sud

la bisettrice dell'angolo formato dalla lancetta delle ore e dalla linea congiungente il centro dell'orologio e la cifra 12 sul quadrante, indica la direzione del Sud (ciò vale soltanto per l'emisfero settentrionale).

### ■ Orientarsi con le stelle

La Stella Polare

Di notte, nell'emisfero settentrionale è possibile orientarsi con la Stella Polare, che indica a qualsiasi ora esattamente il Nord. La **Stella Polare** ha la particolarità di mantenere la stessa posizione nel cielo per tutta la notte (è infatti allineata con l'asse di rotazione terrestre), a differenza di tutte le altre stelle, che apparentemente le ruotano lentamente intorno. Per localizzare la Stella Polare, poco appariscente, bisogna prima individuare la costellazione di cui fa parte, detta Orsa Minore, o Piccolo Carro, con l'aiuto della costellazione vicina (Orsa Maggiore, o Grande Carro), facilmente riconoscibile. Nell'emisfero meridionale, dove la Stella Polare non è visibile, si fa riferimento alla Croce del Sud, formata da quattro stelle che costituiscono i vertici di una croce: il punto di intersezione dei bracci della croce indica sempre il Sud.

## 5.4 I riferimenti sulla superficie terrestre

Per fissare univocamente un punto su una superficie sferica (per esempio, volta celeste, superficie terrestre), è necessario utilizzare sistemi di riferimento adeguati, che permettano la definizione di sistemi di coordinate. Per il nostro pianeta, si è fissato un sistema di riferimento immaginando di tracciare sulla superficie terrestre delle circonferenze, i **meridiani** e i **paralleli**, che nel loro insieme costituiscono il **reticolato geografico**.

Meridiani

### ■ Meridiani e paralleli

I **meridiani** (dal latino *meridies*, mezzogiorno) sono cerchi massimi passanti per i poli, che si ottengono immaginando di intersecare la Terra con infiniti piani passanti per l'asse terrestre: si determinano così sulla superficie terrestre infinite circonferenze immaginarie, tutte uguali, ciascuna della lunghezza di circa 40 000 km, dette cerchi meridiani. Ciascuno di essi viene diviso dai poli in due semicirconferenze, dette meridiano e antimeridiano. Pur essendo infiniti, per convenzione si prendono in esame solo 360 meridiani geografici, distanti uno dall'altro un arco di ampiezza pari a 1°.

Paralleli

I **paralleli** sono cerchi immaginari risultanti dall'intersezione della superficie terrestre con infiniti piani paralleli tra loro e perpendicolari all'asse terrestre. Si determinano così in-

finite circonferenze immaginarie, la cui lunghezza diminuisce (da circa 40 000 a 0 km) procedendo dall'**Equatore** (**cerchio massimo**, ottenuto intersecando la superficie terrestre con un piano perpendicolare all'asse terrestre e passante per il centro della Terra), verso i poli, in cui l'intersezione è rappresentata da un punto.

Equatore

Oltre all'Equatore, anche ad altri paralleli sono stati assegnati nomi particolari: si tratta dei due cerchi polari, Artico e Antartico, e dei due Tropici, del Cancro e del Capricorno, rispettivamente a N e a S dell'Equatore.

Poli e Tropici

### ■ Reticolato geografico

I meridiani e i paralleli si intersecano secondo angoli retti e, nel loro insieme, formano il **reticolato geografico**, cioè una rete immaginaria che avvolge la superficie terrestre con maglie a forma di trapezio sferico (tranne quelle triangolari tra l'ultimo parallelo e il polo).

Come in tutti i sistemi di coordinate, è necessario fissare dei riferimenti; come meridiano di riferimento è stato scelto il **meridiano di Greenwich**, che passa per l'osservatorio astronomico situato nell'omonima località presso Londra, detto anche meridiano fondamentale. L'**antimeridiano** corrispondente, o meridiano 180°, passa per l'Oceano Pacifico. Nelle carte topografiche italiane, il meridiano di riferimento è quello passante per l'osservatorio di Monte Mario (Roma).

Il meridiano di Greenwich

Il parallelo di riferimento è l'**Equatore**, che divide la Terra in due emisferi: quello boreale, compreso tra l'Equatore e il polo Nord, e quello australe tra l'Equatore e il polo Sud.

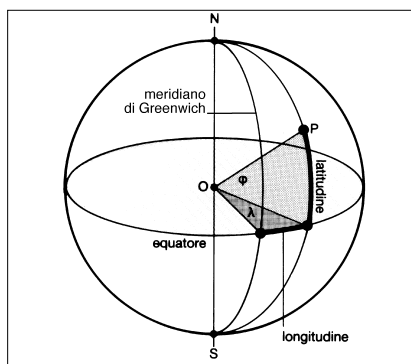
### ■ Le coordinate geografiche

La posizione assoluta di un luogo sulla superficie terrestre risulta esattamente determinata conoscendo le sue coordinate geografiche: la latitudine, la longitudine e l'altitudine. La **latitudine** ( $\varphi$ ) di un punto **corrisponde alla sua distanza angolare dall'Equatore** e si misura in gradi e frazioni di grado sul meridiano che passa per quel punto. La latitudine può essere compresa tra 0° e 90° Nord, se il punto si trova a nord dell'equatore, e tra 0° e 90° Sud, se il punto si trova a sud dell'equatore. Tutti i punti che si trovano sull'equatore hanno latitudine 0°.

Latitudine

La **longitudine** ( $\lambda$ ) di un punto **corrisponde alla sua distanza angolare dal meridiano fondamentale** e si misura in gradi e frazioni di grado sul parallelo che passa per quel punto. La longitudine può essere compresa tra 0° e 180° Est (se il punto si trova a est del meridiano fondamentale) e tra

Longitudine



**Figura 5.3**  
Le coordinate geografiche: la latitudine ( $\varphi$ ) e la longitudine ( $\lambda$ ) del punto P sulla superficie terrestre.

$0^\circ$  e  $180^\circ$  Ovest (se il punto si trova a ovest del meridiano fondamentale). Tutti i punti che si trovano sul meridiano fondamentale hanno longitudine  $0^\circ$  (fig. 5.3).

L'**altitudine** di un punto è la **distanza verticale** del punto dal **livello medio del mare**, assunto come superficie di riferimento.

Altitudine

## 5.5 I movimenti terrestri

La Terra e tutti i pianeti ruotano, contemporaneamente, intorno al proprio asse e intorno al Sole. Oltre ai **moti di rotazione e rivoluzione**, di cui possiamo facilmente renderci conto poiché essi sono la causa di fenomeni osservabili da tutti, la Terra compie altri movimenti, detti moti millenari, le cui conseguenze non ci sono altrettanto familiari (v. riquadro).

### I MOTI MILLENARI

Oltre ai moti di rotazione e di rivoluzione, la Terra compie movimenti detti millenari, perché i loro effetti si manifestano solo nel corso di millenni; questi moti sono dovuti all'attrazione gravitazionale che soprattutto il Sole e la Luna, ma anche altri corpi del sistema solare, esercitano sul nostro pianeta (va anche segnalato che la Terra partecipa con tutto il sistema solare al **moto di traslazione** intorno al centro della Galassia, il cui effetto consiste in un apparente spostamento del sistema solare verso la costellazione di Ercole).

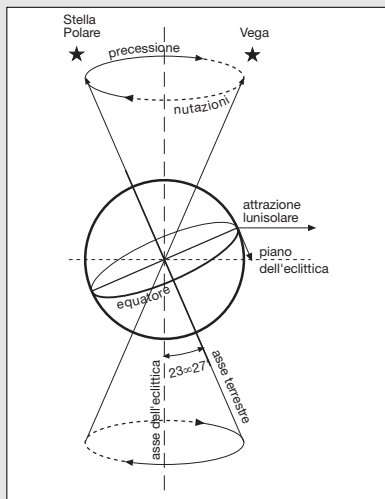
**Moto di precessione.** Per effetto dell'attrazione esercitata dal Sole e dalla Luna, l'asse terrestre non si mantiene sempre parallelo a se stesso, ma, molto lentamente nel corso dei millenni, tende a diventare perpendicolare al piano dell'eclittica; la rotazione della Terra si oppone a questo cambiamento e tende a mantenere costante la posizione dell'asse: il risultato dell'azione di queste due forze è un moto, detto **precessione lunisolare**, in cui l'asse terrestre descrive un doppio cono intorno all'asse dell'eclittica, con il vertice

## I MOTI MILLENARI (segue)

nel centro della Terra (fig. A). A questo moto, che ha un periodo di 26 000 anni, si deve la precessione degli equinozi, cioè un'anticipazione dei momenti in cui, ogni anno, si verificano gli equinozi. Infatti, il cambiamento di direzione dell'asse terrestre comporta lo spostamento nello spazio dell'equatore celeste; quindi varia anche l'intersezione fra il piano dell'equatore celeste e quello dell'eclittica, intersezione che corrisponde alla linea degli equinozi. Poiché il moto conico dell'asse terrestre avviene in senso antiorario, anche la linea degli equinozi si muove in questo senso, che risulta contrario (moto retrogrado) al movimento della Terra sulla sua orbita. Perciò, ogni anno gli equinozi si verificano con un anticipo di circa 20 minuti rispetto all'anno precedente. Un'altra conseguenza del moto di precessione è che l'asse terrestre, nel corso del tempo, non continuerà a puntare verso la Stella Polare, come avviene ora, ma, quando l'asse avrà percorso circa metà giro, il suo prolungamento indicherà la stella Vega, nella costellazione della Lira.

**Nutazioni.** L'attrazione gravitazionale, esercitata dal Sole e dalla Luna durante il moto di precessione, dipende dalle distanze relative tra Sole, Luna e Terra; ma, poiché anche queste variano di continuo, nel moto di precessione si notano piccole oscillazioni periodiche (con periodi di circa 19 anni) dette **nutazioni** (dal latino *nutare*, vacillare, inclinare). In conseguenza di queste oscillazioni, i poli non descrivono linee perfettamente circolari, ma leggermente ondulate (fig. A).

**Variazione di eccentricità.** La variazione di eccentricità dell'orbita terrestre comporta deformazioni dell'orbita stessa, che tende ad accorciarsi (eccentricità minore) e ad allungarsi (eccentricità maggiore).



**Figura A**

*Moti millenari: la precessione e le nutazioni.*

Anche tale fenomeno è dovuto all'attrazione gravitazionale esercitata dal Sole e dagli altri pianeti del sistema solare e ha un periodo di 92 000 anni.

**Variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre.** La variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre rispetto alla verticale al piano dell'orbita è molto lenta e ha un periodo di 40 000 anni. Attualmente l'asse terrestre è inclinato di  $23^{\circ}27'$  rispetto alla verticale del piano dell'eclittica, ma questo angolo può variare da un massimo di  $24^{\circ}36'$  a un minimo di  $21^{\circ}58'$ . Poiché dall'inclinazione dell'asse terrestre dipendono le stagioni, questa variazione influenza le differenze climatiche fra le stagioni nel corso dei millenni.

## ■ Il moto di rotazione

La Terra compie un moto di **rotazione intorno al proprio asse**, da ovest verso est, cioè in senso inverso all'apparente moto diurno del Sole e della sfera celeste. La durata del

Giorno sidereo  
e giorno solare

moto di rotazione è detta giorno e il suo valore dipende dal sistema di riferimento utilizzato. Il **giorno sidereo** (tempo che intercorre fra due passaggi successivi di una stella su un dato luogo della superficie terrestre) è di 23h 56m 4s, mentre il **giorno solare** (tempo che intercorre fra due passaggi successivi del Sole alla sua massima altezza sull'orizzonte di un dato luogo) è più lungo di 3m 56s e dura 24 ore.

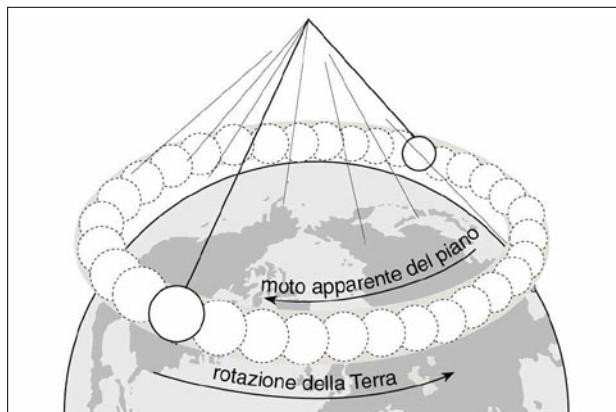
Tutti i punti della Terra compiono una rotazione completa di 360° in un giorno, con velocità angolare costante a tutte le latitudini, a eccezione dei poli, dove la velocità angolare è zero. Al contrario, la velocità lineare, cioè la distanza percorsa da un punto nell'unità di tempo, varia molto con la latitudine, a seconda della lunghezza della circonferenza descritta da un punto durante la rotazione (la velocità lineare è perciò massima all'Equatore e nulla ai poli).

Le prove  
della rotazione

La prima prova **diretta** della rotazione terrestre fu conseguita nel 1792, quando l'**astronomo italiano G.B. Guglielmini** misurò uno spostamento di 17 mm verso est, rispetto alla verticale, di un oggetto lasciato cadere liberamente da un'altezza di 100 m: questo fatto si può spiegare ammettendo la rotazione terrestre da ovest verso est. Infatti, poiché il corpo partecipa alla rotazione terrestre, lanciato da una certa quota esso mantiene per inerzia la velocità iniziale di rotazione, che è superiore rispetto a quella del punto in cui cade (essendo questo più vicino all'asse terrestre).

Il pendolo  
di Foucault

Nel 1851 il **fisico francese J.L. Foucault** (1819-1868) offrì con un suo famoso esperimento una prova diretta della rotazione terrestre. Egli attaccò alla cupola del Pantheon di Parigi un pendolo costituito da un filo d'acciaio lungo circa 67



**Figura 5.4**  
Prova della rotazione  
terrestre secondo  
l'esperimento  
di Foucault.

m, a cui era appesa una pesante palla di cannone, terminante con una punta, e sotto il pendolo stese un sottile strato di sabbia; quindi mise in moto il pendolo secondo la direzione nord-sud. È noto dalle leggi della fisica che il piano di oscillazione di un pendolo libero di muoversi rimane fisso nello spazio; ora, le tracce lasciate dalla punta del pendolo sulla sabbia, durante le sue oscillazioni, indicavano uno spostamento apparente del piano di oscillazione: poiché il pendolo, per ipotesi, non poteva avere cambiato la sua posizione, si doveva ammettere che era il piano sottostante il pendolo, cioè la superficie terrestre, a ruotare (fig. 5.4).

## ■ Il moto di rivoluzione

La Terra compie un moto di rivoluzione attorno al Sole in senso antiorario (immaginando di osservare il moto dal polo Nord celeste), secondo un'orbita ellittica poco schiacciata (l'eccentricità dell'orbita, data dal rapporto tra la distanza del Sole dal centro dell'ellisse e il semiasse maggiore, è di 0,017; in una circonferenza l'eccentricità è invece uguale a zero). Ricordando la prima legge di Keplero (v. a p. 40), la distanza massima della Terra dal Sole (afelio) è di 152 milioni di km, mentre la minima (perielio) è di 147 milioni di km (in media 149,6 milioni di km). Il percorso viene effettuato con velocità diverse (seconda legge di Keplero): al perielio la velocità è pari a 30,3 km/sec, mentre scende a 29,3 km/sec all'afelio. La durata del moto di rivoluzione è detta anno e assume valori diversi a seconda del riferimento utilizzato. L'anno solare (tempo che intercorre fra due successivi passaggi del Sole allo zenit dello stesso tropico) è di 365g 5h 48m, circa 20 minuti più breve dell'anno sidereo (tempo che intercorre fra due successivi ritorni del Sole nella stessa posizione rispetto alle stelle), che è di 365g 6h 9m.

Una dimostrazione del moto di rivoluzione terrestre fa riferimento all'effetto Doppler (v. cap. 4, riquadro a p. 60); misurando la frequenza delle onde luminose provenienti da una stella, si rileva infatti che, durante una parte dell'anno, la Terra si avvicina alla stella, mentre sei mesi dopo se ne allontana.

Una prova diretta della rivoluzione terrestre è fornita dall'aberrazione della luce proveniente dalle stelle. Quando da Terra osserviamo una stella con un telescopio, ne vediamo la luce provenire da una direzione che non è quella reale, ma spostata rispetto a essa di un piccolo angolo, detto angolo di aberrazione, il cui valore varia al variare della velocità con cui la Terra compie il moto di rivoluzione; ciò è dovuto al fatto che, mentre la luce percorre la distanza tra

L'ellittica

Afelio e perielio

Anno solare  
e anno sidereo

Prove del moto  
di rivoluzione



l'obiettivo e l'oculare del telescopio, la Terra compie un piccolo spostamento lungo la sua orbita intorno al Sole.

## 5.6 Conseguenze dei moti della Terra

I moti di rotazione e di rivoluzione della Terra sono responsabili di alcuni fenomeni facilmente osservabili da tutti:

- l'alternarsi del dì e della notte;
- la diversa durata del dì e della notte;
- il succedersi delle stagioni.

### ■ L'alternarsi del dì e della notte

Il moto di rotazione terrestre, che si compie nell'arco di 24 ore, periodo a cui si dà il nome di **giorno solare**, provoca l'alternarsi del dì (periodo di luce) e della **notte** (periodo di buio). I raggi del Sole arrivano sulla Terra paralleli fra loro e, a causa della sfericità terrestre, in ogni momento illuminano solo la metà della superficie terrestre rivolta verso il Sole (dì), mentre l'altra metà è al buio (notte). Il circolo massimo che divide la parte rischiarata da quella in ombra è detto **circolo di illuminazione** e si sposta continuamente durante il moto di rotazione.

Il passaggio dal dì alla notte

Il **passaggio dal dì alla notte avviene gradualmente**, per la presenza intorno alla Terra dell'atmosfera, che diffonde, riflette e rifrange la luce solare: si originano così l'**alba** (periodo durante il quale la luce del Sole comincia a diffondersi prima che esso sia visibile sopra l'orizzonte) e il **crepuscolo** (periodo durante il quale la luce diminuisce d'intensità dopo che il Sole è sceso sotto l'orizzonte).

### ■ La diversa durata del dì e della notte

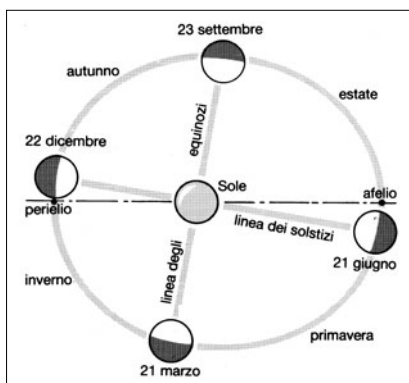
Se l'asse terrestre fosse perpendicolare al piano dell'orbita, il circolo d'illuminazione passerebbe sempre per i poli e taglierebbe esattamente in due parti uguali tutti i paralleli; quindi, per tutto l'anno e in ogni punto della Terra, il dì e la notte avrebbero la stessa durata, cioè 12 ore ciascuno. Ma, poiché l'asse terrestre è inclinato di  $66^{\circ}33'$  sul piano dell'orbita, e inoltre si mantiene parallelo a se stesso durante il moto di rivoluzione intorno al Sole, nel corso dell'anno il circolo d'illuminazione non passa sempre per i poli e ciò determina la diversa durata del dì e della notte e anche, come si vedrà di seguito, l'alternarsi delle stagioni.

Solstizio d'estate

Il 21 giugno, giorno del **solstizio d'estate**, il polo Nord è rivolto verso il Sole e il circolo d'illuminazione, tangente ai circoli polari Artico e Antartico, taglia a metà l'equatore; nell'emisfero boreale la superficie illuminata è maggiore di

**Figura 5.5**

*Il moto di rivoluzione terrestre causa l'alternarsi delle stagioni.*



quella in ombra e si hanno il dì più lungo e la notte più corta dell'anno (nell'emisfero australe si hanno, invece la notte più lunga e il dì più corto; fig. 5.5). Nella zona compresa tra il Circolo Polare Artico e il polo Nord, in questo giorno il sole non tramonta e il dì dura 24 ore.

Il 21 dicembre, giorno del **solstizio d'inverno**, è invece il polo Sud a essere rivolto verso il Sole, perciò nell'emisfero boreale la superficie illuminata è minore di quella in ombra: si hanno il dì più corto e la notte più lunga dell'anno (l'opposto avviene nell'emisfero australe). Nella zona compresa tra il Circolo Polare Artico e il polo Nord, in questo giorno il Sole non sorge e la notte dura 24 ore. Tra il 21 giugno e il 21 dicembre, nell'emisfero boreale progressivamente il dì si accorcia e la notte si allunga, mentre tra il 21 dicembre e il 21 giugno si allunga il dì e si accorcia la notte (l'opposto avviene nell'emisfero australe).

In due soli giorni dell'anno, il 21 marzo, **equinozio di primavera**, e il 23 settembre, **equinozio d'autunno**, il dì e la notte hanno la stessa durata in tutti i punti della Terra. Ciò accade perché nessuno dei due poli è inclinato verso il Sole: il circolo d'illuminazione passa per i poli, taglia a metà tutti i paralleli e le condizioni di illuminazione sono uguali in entrambi gli emisferi.

Solo all'equatore, dunque, il dì e la notte hanno la stessa durata per tutto l'anno.

## ■ Il succedersi delle stagioni

A causa dell'inclinazione dell'asse terrestre, nel corso dell'anno non **varia** solo la durata del dì e della notte, ma anche l'**inclinazione** con cui i raggi solari giungono sulla superficie

Solstizio d'inverno

Equinozi  
di primavera  
e d'autunno

terrestre e quindi il riscaldamento che ne deriva; più precisamente, il riscaldamento è massimo quando i raggi solari formano un angolo retto con il piano tangente alla superficie terrestre in un punto, mentre è minore se il valore di questo angolo si riduce: a ciò si deve dunque l'alternarsi di periodi caldi e periodi freddi, cioè il succedersi delle stagioni.

L'inizio e la fine delle stagioni astronomiche, intervalli di tempo fra un solstizio e l'equinozio successivo, o fra un equinozio e il solstizio successivo, è indicato nella tab. 5.2.

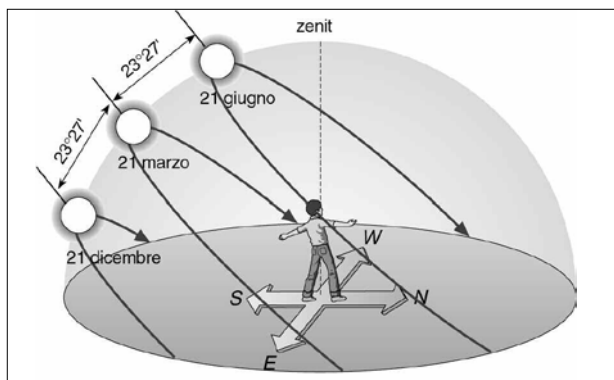
Nell'emisfero boreale:

- Primavera ● la **primavera** dura dal 21 marzo al 21 giugno. Il 21 marzo il sole culmina (i raggi solari giungono perpendicolari) sull'equatore; l'energia solare trasmessa è massima all'equatore e diminuisce procedendo verso i poli. Il flusso di energia si modifica nel tempo avvicinandosi al solstizio estivo;
- Estate ● l'**estate** dura dal 21 giugno al 23 settembre. Nel solstizio estivo l'energia trasmessa è massima al Tropico del Cancro (i raggi sono perpendicolari a questo parallelo); il polo Nord è illuminato, mentre il polo Sud è in ombra (il flusso energetico è maggiore nell'emisfero boreale rispetto a quello australe);
- Autunno ● l'**autunno** dura dal 23 settembre al 21 dicembre. Nell'equinozio autunnale si ripetono le condizioni di quello primaverile, che si modificano via via che si avvicina il solstizio invernale;
- Inverno ● l'**inverno** dura dal 21 dicembre al 21 marzo. Al solstizio invernale l'energia trasmessa è massima al Tropico del Capricorno, dove i raggi, a mezzogiorno, sono perpendicolari sull'orizzonte. Il polo Sud è illuminato, mentre il polo Nord è in ombra (il flusso energetico è maggiore nell'emisfero australe rispetto a quello boreale).

**Le stagioni astronomiche non coincidono del tutto con le stagioni meteorologiche**, cioè con il reale andamento del tempo meteorologico. Ciò è dovuto al fatto che l'atmosfera, l'idrosfera e la litosfera assorbono la radiazione solare e cedono calore con un certo ritardo, impedendo di percepire subito gli effetti sul clima dovuti alle variazioni dell'inclinazione dei raggi solari. Inoltre, a causa della variazione dell'angolo che i raggi solari formano con la superficie terrestre, con il succedersi delle stagioni varia l'altezza degli archi che

**Tabella 5.2 Le stagioni**

EMISFERO BOREALE	EMISFERO AUSTRALE	DURATA
primavera	autunno	21 marzo - 21 giugno
estate	inverno	21 giugno - 23 settembre
autunno	primavera	23 settembre - 21 dicembre
inverno	estate	21 dicembre - 21 marzo



**Figura 5.6**  
Variazione dell'altezza  
del Sole durante l'anno  
in una località situata  
alle medie latitudini  
nell'emisfero boreale.

## LE ZONE ASTRONOMICHE

In base alla diversa inclinazione dei raggi solari sulla superficie terrestre nel corso dell'anno, su di essa si possono distinguere diverse **zone astronomiche**, caratterizzate da diverse condizioni di riscaldamento.

**Zona torrida**, compresa tra il Tropico del Cancro e quello del Capricorno. Il Sole passa sulla verticale di tutti i punti compresi in questa zona due volte all'anno (una sola volta sui tropici): durante gli equinozi sull'equatore, in momenti diversi sugli altri punti (una volta prima e una volta dopo il solstizio estivo sui punti compresi tra l'equatore e il Tropico del Cancro, una volta prima e una volta dopo il solstizio invernale sui punti compresi tra l'equatore e il Tropico del Capricorno, a maggior distanza di tempo dai solstizi quanto più il punto considerato è vicino all'equatore). In questa zona la temperatura si mantiene alta per quasi tutto l'anno, perciò in essa non si registrano notevoli differenze tra le stagioni.

**Zona temperata boreale**, fra il Tropico del Cancro e il Circolo Polare Artico. La massima altezza raggiunta dal Sole nel giorno del solstizio estivo varia da  $90^\circ$  al tropico a  $46^\circ54'$  al circolo polare. Il giorno del solstizio invernale, in questa zona il Sole non si leva sull'orizzonte.

**Zona temperata australe**, fra il Tropico del Capricorno e il Circolo Polare Antartico. La massima altezza raggiunta dal Sole nel solstizio invernale varia da  $90^\circ$  al tropico sino a  $46^\circ54'$  al circolo polare. Il giorno del solstizio estivo, in questa zona il Sole non si leva sull'orizzonte.

Nelle due zone temperate, il riscaldamento varia notevolmente nel corso dell'anno e in esse le differenze tra le stagioni sono nette.

**Calotta polare artica**, a nord del Circolo Polare Artico. Al polo Nord, dall'equinozio di autunno a quello di primavera, il Sole si mantiene sempre sotto l'orizzonte: è la notte polare, periodo che dura sei mesi. Nel solstizio estivo l'altezza massima raggiunta dal Sole è di  $23^\circ27'$ .

**Calotta polare antartica**, a sud del Circolo Polare Antartico. La massima altezza raggiunta dal Sole durante il solstizio estivo varia da  $46^\circ54'$  al circolo polare sino a  $23^\circ27'$  al polo. Al polo Sud, dall'equinozio di primavera sino a quello autunnale, il Sole si mantiene sotto l'orizzonte.

Poiché nelle zone polari il Sole è basso sull'orizzonte o, in alcuni periodi, addirittura sotto l'orizzonte, esse ricevono minor energia solare e la temperatura si mantiene bassa per tutto l'anno.

il Sole sembra descrivere nel cielo durante il suo moto apparente, dall'alba al tramonto (fig. 5.6). Sulla base dell'inclinazione dei raggi solari nelle diverse stagioni astronomiche, si possono individuare sulla superficie terrestre differenti **zone astronomiche**, caratterizzate da specifiche condizioni climatiche (v. riquadro a p. 75).

## GLOSSARIO

### Anno

Tempo impiegato dalla Terra per compiere una rivoluzione attorno al Sole. A seconda che si prendano come riferimento una stella fissa o due successivi equinozi, si ha l'anno sidereo o l'anno tropico, detto anche anno solare. In conseguenza del fenomeno della precessione degli equinozi, l'anno tropico, che ha una durata di 365 giorni 5 ore e 46 minuti, è più corto del sidereo di circa 20 minuti. Dall'anno tropico deriva l'anno civile, che è diviso in 365 giorni; la frazione rimanente va a costituire, ogni quattro anni, l'anno bisestile di 366 giorni.

### Bussola

Strumento usato per l'orientamento geografico e la navigazione, costituito da un ago d'acciaio calamitato, girevole, imperniato su una rosa dei venti, che ha la proprietà di indicare costantemente la direzione del nord magnetico.

### Crepuscolo

Debole luce che illumina il cielo poco prima del sorgere del Sole e subito dopo il tramonto.

### Di

Periodo di luce, la cui durata varia nel corso dell'anno; nell'emisfero boreale la durata del dì è massima il giorno del solstizio d'estate e minima il giorno del solstizio d'inverno.

### Ellissoide

Superficie che si ottiene facendo ruotare un'ellisse intorno a uno dei suoi assi.

### Equinozio

Giorno nel quale la durata del dì e della notte è uguale in ogni punto della Terra.

### Geoide

Superficie che risulta in ogni suo punto perpendicolare alla forza di gravità e assume un aspetto irregolare, ondulato, in conseguenza della distribuzione non omogenea della densità terrestre. Può essere immaginato come la superficie oceanica media, supponendo che essa proseguiva in modo continuo nei continenti, divenendo leggermente convessa (le montagne vengono però tagliate fuori). La superficie del geoide serve come riferimento per le misure topografiche, dell'altitudine e della profondità dei mari.

### Giorno

Intervallo di tempo impiegato dalla Terra per compiere una rotazione su se stessa.

### Inclinazione

Angolo formato dal piano dell'orbita di un corpo celeste con il piano dell'eclittica. Nel caso della Terra, l'inclinazione della sua orbita è detta obliquità dell'eclittica e vale  $23^{\circ}27'$ .

### Latitudine

Distanza angolare di un punto dall'equatore, che si misura in gradi e frazioni di grado sul meridiano che passa per quel punto.

### Longitudine

Distanza angolare di un punto dal meridiano di riferimento, misurata sull'arco di parallelo passante per quel punto.

### Rosa dei venti

Rappresentazione grafica delle direzioni dei venti corrispondenti alle direzioni dei quattro punti cardinali e alle direzioni intermedie.

## TEST DI VERIFICA

**1** L'inclinazione dell'asse terrestre rispetto al piano dell'orbita di rivoluzione è di:

- a  $23^{\circ}27'$ ;
- b  $45^{\circ}$ ;
- c  $90^{\circ}$ ;
- d  $66^{\circ}33'$ .

**2** Il tempo impiegato dalla Terra per compiere un giro intorno al Sole è:

- a un giorno;
- b una settimana;
- c un mese;
- d un anno.

**3** I solstizi si verificano:

- a il 21 giugno e il 23 settembre;
- b il 21 marzo e il 23 dicembre;
- c il 22 dicembre e il 21 giugno;
- d il 22 giugno e il 21 dicembre.

**4** Il 21 marzo i raggi del Sole cadono perpendicolari:

- a all'equatore;
- b ai poli;
- c al Tropico del Cancro;
- d al Tropico del Capricorno;
- e al Circolo Polare Artico.

**5** La zona temperata australe è situata:

- a fra il Tropico del Cancro e quello del Capricorno;
- b tra il Circolo Polare Artico e l'equatore;
- c fra il Tropico del Cancro e il Circolo Polare Antartico;
- d fra il Tropico del Capricorno e il Circolo Polare Antartico.

**6** Possiamo definire il geoido come:

- a una superficie che risulta in ogni suo punto perpendicolare alla forza di gravità;
- b una figura sferica schiacciata ai poli e rigonfia all'equatore;
- c una figura piana;
- d una figura ottenuta ruotando attorno a un asse terrestre la massa terrestre.

**R**

1 d; 2 d; 3 c; 4 a; 5 d; 6 a.

# 6 La rappresentazione cartografica della superficie terrestre

---

*Attraverso i tentativi fatti dall'uomo, nel corso di millenni, di raffigurare su un piano in misura ridotta porzioni più o meno ampie della superficie terrestre, si è sviluppata la **cartografia**, la scienza che fornisce le tecniche di rilevamento e gli strumenti matematici (**proiezioni geometriche**) per elaborare **carte geografiche**.*

*Poiché non è possibile trasportare una superficie sferica su un piano senza deformarla, una carta geografica è sempre una rappresentazione approssimata della superficie terrestre. Le aree e le distanze vengono ridotte secondo un criterio di proporzionalità, detto **scala**.*

*Tra i compiti attuali della cartografia vi è quello di rappresentare non solo le forme naturali del territorio (**carte generali** e **carte speciali**), ma anche la distribuzione di alcuni aspetti, per esempio, di tipo economico o ecologico, attraverso le **carte tematiche**, che permettono di riconoscere le situazioni esistenti e di controllare le trasformazioni in atto.*

## 6.1 Le carte geografiche

Una **carta geografica** può essere definita come **una raffigurazione su un piano di una parte o di tutta la superficie terrestre**; la scienza depositaria delle conoscenze e delle tecniche che permettono l'elaborazione di carte geografiche è la **cartografia**. Il tipo di rappresentazione fornito da una carta geografica ha le seguenti caratteristiche di base: è approssimata, ridotta e simbolica.

Rappresentazione  
approssimata

Una carta è **approssimata** perché non è possibile trasferire una superficie sferica (come quella terrestre) su un piano senza modificarla; infatti, le varie parti che costituiscono una superficie sferica, durante il loro trasferimento su un piano subiscono inevitabilmente delle deformazioni, che saranno tanto maggiori quanto più estesa è la porzione di sfera interessata; il grado di approssimazione delle carte geografiche tende perciò ad aumentare con l'estendersi della zona che si vuole raffigurare. Per contenere le deformazioni entro limiti accettabili, si ricorre a tecniche di proiezione geometrica (v. par. 6.3).

## L'EVOLUZIONE DELLA CARTOGRAFIA

I documenti cartografici più antichi pervenuti fino a noi risalgono all'antico Egitto e alle civiltà mesopotamiche e riguardano piani di città o mappe di limitate regioni minerarie. Con l'ampliarsi dell'interesse scientifico, parallelamente al progresso della matematica e dell'astronomia, si pervenne già da parte degli Egizi alla costruzione di carte dell'intera Terra, di cui gli esempi più antichi giunti fino a noi risalgono al greco Anassimandro di Mileto (VI secolo a.C.). La speculazione filosofica greca portò ben presto a postulare la sfericità della Terra, intuizione che consentì, con l'ausilio delle rilevazioni astronomiche, di tentare i primi calcoli delle dimensioni del pianeta (Eratostene di Cirene, 276-296 a.C.), e di cui la cartografia tenne conto, sviluppando la scienza delle proiezioni geografiche e perfezionando la rappresentazione del mondo allora conosciuto. La più famosa di tali carte è quella di Claudio Tolomeo (II secolo d.C.), che per la prima volta nella storia della cartografia applicò un sistema geometrico alla costruzione del suo planisfero.

In età romana si sviluppò la cartografia cosiddetta itineraria, perché destinata a soddisfare le esigenze dei viaggiatori, illustrando itinerari e distanze.

Nel Medioevo si rifiutò la nozione della sfericità della Terra e anche la cartografia subì l'influsso delle interpretazioni dettate dai teologi e basate sul contenuto delle Sacre Scritture. Le semplici interpretazioni cosmografiche si traducevano nei planisferi a "T", in cui l'ecumene (dal greco *oikouménē*, terra abitata), divisa nelle tre parti fondamentali, Europa, Asia e Africa, era circondata dalle acque oceaniche. Fu proprio nel tardo Medioevo che le città marinare del Mediterraneo produssero le prime carte nautiche (dette portolani), nelle quali la forma delle terre appare di una sorprendente verosimiglianza. L'uso della bussola aveva infatti permesso la fedele riproduzione dell'andamento delle coste, ma il reticolato geografico era costituito

dalle rette tracciate nelle varie direzioni delle rose dei venti.

Nel Rinascimento, il nuovo interesse per la cultura classica suscitato dagli umanisti riportò alla luce le opere cosmografiche dei Greci e, fra esse, quelle di Tolomeo, il cui atlante fu ripreso e integrato con carte moderne sempre più numerose. Nel frattempo, la riacquisita nozione della sfericità della Terra promuoveva lo studio dei migliori sistemi di proiezione, mentre l'ampliarsi delle conoscenze geografiche in concomitanza con l'epoca delle grandi scoperte consentiva di raffigurare le reali dimensioni del pianeta.

Il XVI secolo, a partire dal quale la cartografia progredisce di pari passo con le conoscenze geografiche, è il periodo più ricco di realizzazioni, a opera specialmente di cartografi italiani, tra cui si segnala G. Gastaldi (1500-1556), e olandesi, tra cui G. Kremer (1512-1594), detto Mercatore, ideatore della nota proiezione cartografica che da lui prende il nome, e il suo discepolo Ortelio (A. Oortel, 1527-1598), che realizzò il primo atlante moderno, il *Theatrum Orbis Terrarum*.

Agli inizi del XVII secolo, l'olandese W. Snellius (1580-1626) misurò per primo una base geodetica e applicò la triangolazione per la determinazione delle distanze e delle altezze. La prima carta topografica rigorosamente geometrica è quella del territorio francese per opera di C.F. Cassini (1677-1756), pubblicata nel 1746.

Nel XIX secolo fu completato l'allestimento da parte di vari Stati delle cartografie nazionali topografiche e derivate. In Italia, questo compito fu affidato, a partire dal 1861 (anno dell'Unità), all'Ufficio Tecnico del Corpo di Stato Maggiore, divenuto in seguito (1872) Istituto Topografico Militare e più tardi (e fino a oggi) Istituto Geografico Militare. Nel XX secolo, un notevole progresso tecnico è rappresentato dall'aerofotogrammetria e dal rilevamento da satellite.



Rappresentazione  
ridotta

Una carta deve essere, ovviamente, una **rappresentazione ridotta** della realtà, secondo un certo fattore che rappresenta la scala di riduzione, o semplicemente **scala**. La scala (che può essere numerica o grafica) definisce il rapporto tra la distanza fra due punti misurata sulla carta e la distanza reale fra gli stessi due punti, cioè misurata sul terreno.

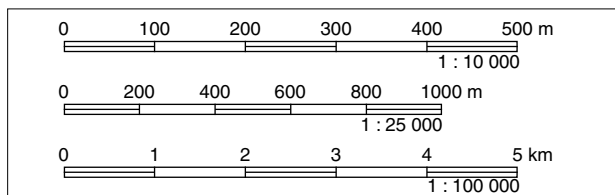
Scala numerica

La **scala numerica** viene espressa con una frazione, in cui il numeratore è l'unità e il denominatore è un numero che indica quante volte va moltiplicata una distanza misurata sulla carta per ottenere la distanza reale sulla superficie terrestre. Per esempio, una scala  $1/25\ 000$ , o  $1 : 25\ 000$  (si legge "uno a venticinquemila") significa che 1 cm sulla carta corrisponde a 25 000 cm nella realtà (cioè 250 m).

Per conoscere la scala di una carta che ne è priva, si può misurare la distanza tra due paralleli, tenendo conto che la distanza reale lineare di  $1^\circ$  di meridiano (compreso tra due paralleli intervallati di  $1^\circ$ ) è di 111,121 km, cioè 11 112 100 cm. Se la distanza misurata sulla carta è, per esempio, 2 cm, la scala sarà  $(2/2) : (11\ 112\ 100/2)$ , cioè  $1 : 5\ 556\ 050$ . Se sulla carta non sono segnati i meridiani e i paralleli, si potrà prendere in considerazione, per esempio, una distanza reale nota, in linea d'aria, tra due località ed eseguire la stessa operazione.

Scala grafica

La **scala grafica**, già usata nella cartografia antica, è rappresentata da un segmento suddiviso in parti uguali che corrispondono a un'unità di misura lineare, segnata sui segmenti stessi. La scala grafica è di uso più immediato rispetto a quella numerica, poiché, senza fare calcoli, ci si può rendere conto della distanza reale: con una riga si misura la distanza tra due punti sulla carta, si appoggia la riga sulla scala grafica e si verifica a quale distanza reale corrisponde la distanza letta prima sulla carta. Inoltre, la scala grafica è preferibile alla numerica quando l'originale di una carta deve essere stampato in formato ridotto: in questo caso, infatti, la scala grafica (cioè il segmento) subisce l'identica riduzione dell'originale, mentre la scala numerica rimane identica nella stampa in formato ridotto (fig. 6.1).



**Figura 6.1**  
Esempi di scale  
grafiche (sono indicate  
le corrispondenti  
scale numeriche).

Una carta è **simbolica** perché **tutti gli elementi di un territorio vi vengono rappresentati mediante simboli convenzionali**, che vengono distinti in altimetrici (relativi all'andamento del rilievo) e planimetrici (che rappresentano elementi naturali del paesaggio, quali scarpate, fiumi, boschi ecc., e artificiali, quali centri abitati, ferrovie, strade, confini ecc.).

Rappresentazione simbolica

### ■ Simboli altimetrici

Per la rappresentazione del rilievo, si può ricorrere a diverse tecniche. Una di queste fa uso delle **isoipse, o curve di livello**, linee chiuse che uniscono tutti i punti del territorio rappresentato che si trovano a una stessa quota e permettono una rappresentazione geometrica esatta delle forme del terreno (le curve di livello che rappresentano l'andamento dei fondali marini o lacustri sono delle **isobate**: esse uniscono punti che si trovano alla stessa profondità). Il loro valore viene decifrato tenendo conto che alcune di esse, le direttrici, sono disegnate con un maggior spessore e che l'equidistanza, cioè la differenza di quota tra due isolinee successive, deve rimanere costante (per esempio, 50 m, leggibile in genere sulla carta in basso a sinistra). Il sistema delle curve di livello permette di visualizzare le forme del rilievo e la distanza tra le varie isoipse ci aiuta a comprendere la pendenza del luogo in esame: isoipse ravvicinate indicano che il pendio è ripido; una zona pianeggiante è caratterizzata, invece, da isoipse distanziate.

Isoipse (e isobate)

Il metodo delle curve di livello può diventare insufficiente quando si rappresentano territori con forti pendenze, poiché le isoipse diventano tanto ravvicinate da essere indistinguibili l'una dall'altra. Si utilizzano allora altre tecniche, quali il tratteggio e le tinte altimetriche.

Nel caso del **tratteggio**, si immagina di illuminare con un **fascio luminoso proveniente da nord-ovest**, il rilievo da rappresentare, che in questo modo risulterà più o meno illuminato (nella realtà lo vedremmo più assolato o in ombra); si disegnano trattini più ravvicinati dove la pendenza è maggiore (meno illuminata dal fascio luminoso) e trattini più radi dove la pendenza è minore (quindi più illuminata). Questo metodo fornisce solo un'idea delle forme del rilievo, ma non indica le altitudini.

Tratteggio

Nel caso delle **tinte altimetriche**, le **variazioni di quota** (o di profondità) **vengono indicate mediante varie colorazioni** convenzionali, ognuna delle quali corrisponde a diverse fasce altimetriche, individuabili nella legenda riportata sulla carta.

Tinte altimetriche

### ■ Simboli planimetrici

Numerosi sono i simboli planimetrici contenuti nelle carte geografiche: si tratta di simboli convenzionali, concordati a livello internazionale, la cui spiegazione è contenuta nelle leggende che corredano le carte.

I simboli convenzionali in cartografia sono raggruppati in tre categorie: puntiformi, lineari, areali.

Simboli puntiformi

I **simboli puntiformi** sono utilizzati quando si voglia localizzare un oggetto, o un fenomeno, considerandolo come un punto (per esempio, la vetta di un monte).

Simboli lineari

I **simboli lineari** servono per rappresentare strade, corsi d'acqua, confini (infatti il loro aspetto ricorda una linea).

Simboli areali

I **simboli areali** raffigurano fenomeni caratterizzati dalla loro estensione geografica (una coltura o la diffusione di un dialetto).

Toponomastica

Anche la **scrittura della toponomastica**, cioè la maniera di riportare i nomi di luoghi sulla carta, rientra fra i simboli cartografici. Se l'elemento è puntiforme, i nomi vanno sempre posti a destra; per le rappresentazioni lineari la scrittura va collocata parallelamente all'andamento dell'elemento di riferimento, mentre per le rappresentazioni areali i nomi vanno inseriti all'interno della superficie stessa. Le diversità nei caratteri e nelle loro dimensioni differenziano gli oggetti in funzione della loro importanza.

## 6.2 Classificazione delle carte geografiche

Le carte geografiche possono essere classificate in base alla scala di riduzione o in base al loro contenuto.

Grande e piccola scala

In termini generali si distinguono:

- carte a **grande scala**, in cui il denominatore è piccolo (per esempio, 1 : 5000); esse rappresentano una piccola porzione di territorio e perciò possono contenere molti particolari;
- carte a **piccola scala**, in cui il denominatore è grande (per esempio, 1 : 5 000 000); esse rappresentano porzioni di territorio molto estese e perciò sono poco dettagliate.

Le categorie specifiche in cui le carte possono essere classificate sono le seguenti:

Piante e mappe

- **piante**, che rappresentano centri urbani, e **mappe**, per le aree rurali, con scale non superiori a 1 : 10 000; sono molto dettagliate e vengono utilizzate soprattutto per scopi pratici, come la costruzione di strade e ferrovie, la stesura dei piani regolatori comunali, la progettazione di impianti, le bonifiche ecc.;

Carte topografiche

- **carte topografiche**, con scale comprese tra 1 : 10 000 e 1 : 100 000; sono assai ricche di particolari e vengono uti-

lizzate per vari scopi che riguardano l'uso e l'organizzazione del territorio;

● **carte corografiche**, con scale comprese tra 1 : 100 000 e 1 : 1 000 000; essendo meno ricche di particolari rispetto alle precedenti, sono più adatte alla conoscenza generale del territorio che non a scopi applicativi. Sono utilizzate per rappresentare una regione o uno Stato; ne sono un esempio le carte turistiche in cui si devono mettere in rilievo le vie di comunicazione;

● **carte geografiche**, con scale piccole, inferiori a 1 : 1 000 000; possono rappresentare anche un intero continente e includono i **planisferi**, che rappresentano in piano tutta la Terra, e i **mappamondi**, che la raffigurano, sempre in piano, divisa in due emisferi (entrambi sono a scala molto piccola, in genere non superiore a 1 : 30 000 000); non bisogna confondere i mappamondi con i **globi**, modelli che riproducono la forma sferica della Terra.

## ■ Classificazione delle carte in base al loro contenuto

In base al loro contenuto, le carte possono essere classificate in **generali** (per esempio, carte fisiche e politiche), speciali, costruite per uno scopo specifico (per esempio, le carte nautiche e le carte geologiche; per queste ultime v. riquadro) e **tematiche**, che descrivono la distribuzione di un particolare fenomeno sul territorio e su alcune delle quali ci

Carte corografiche

Carte geografiche

Carte generali e carte tematiche

### LE CARTE GEOLOGICHE

Le **carte geologiche** mettono in evidenza i **tipi di roccia** che affiorano nella regione considerata. Una carta geologica è costruita a partire da una normale base topografica, con le varie parti colorate in modo diverso a seconda delle rocce presenti in superficie e, sovrapposti, particolari simboli geologici, segni convenzionali che aiutano a rappresentare la struttura geologica della regione cartografata. Alcuni dei simboli geologici usati possono essere corte frecce con varie barre, che rappresentano la giacitura degli strati superficiali; linee più o meno continue e di vari spessori, che rappresentano le fratture osservabili o ipotizzate tenendo conto della stratigrafia. Le rocce spesso compaiono in affioramenti troppo limitati per poter es-

sere cartografati singolarmente; così si uniscono diverse rocce, con caratteri fisici, età, storia geologica simili, in unità geologiche ben cartografabili, a cui si assegna un determinato colore.

Esiste sempre una legenda, in cui, per ogni colore, vengono descritte le caratteristiche tipiche della roccia considerata. Per facilitare la comprensione dell'andamento degli strati in profondità, molte carte hanno a margine sezioni geologiche che mostrano direttamente le strutture profonde in zone significative o dalla struttura geologica molto complicata. Esse rappresentano ciò che si vedrebbe operando un taglio verticale lungo la traccia della sezione (riportata nella carta geologica) e osservando il piano di taglio.

soffermeremo di seguito (tab. 6.1).

Le **carte tematiche**, servendosi di una base topografica, in genere semplificata, riportano la distribuzione geografica di particolari “temi”, fisici, biologici, economici ecc. Gli elementi del territorio che non interessano il tema considerato vengono quindi trascurati. Tra le numerosissime carte tematiche, prenderemo brevemente in esame le geomorfologiche, le pedologiche, le climatiche e le meteorologiche.

● Le **carte geomorfologiche** rappresentano le **forme del terreno** e indicano i processi che le hanno originate. Le forme scolpite dagli agenti naturali (valli, rilievi, depositi ecc.) so-

Carte  
geomorfologiche

**Tabella 6.1** Tipi di carta geografica secondo i contenuti

<b>carte generali</b>	fisiche	rappresentano solo i lineamenti naturali della superficie terrestre (mari, monti, pianure, corsi d'acqua ecc.)
	politiche	rappresentano soprattutto gli aspetti umani (confini politici e amministrativi, città, vie di comunicazione)
	fisico-politiche	rappresentano ambedue gli elementi
<b>carte speciali</b>	carte idrografiche (comprendenti le carte marine)	sono rappresentati sorgenti, corsi d'acqua, bacini, mari e coste
	carte nautiche	servono per la navigazione marittima
	carte aeronautiche	servono per la navigazione aerea
	carte turistiche	vi sono segnate le vie di comunicazione, nonché luoghi di particolare interesse naturale, artistico, culturale ecc.
	carte geologiche	per mezzo di colori e di simboli, indicano i diversi tipi di rocce e la loro età, i giacimenti minerari ecc.
<b>carte tematiche</b>	carte geomorfologiche	rappresentano le forme del terreno e la loro natura
	carte climatiche	visualizzano la distribuzione dei diversi tipi climatici (includono le carte meteorologiche)
	carte della vegetazione	delimitano le aree occupate dalle formazioni vegetali e indicano le specie più diffuse
	carte zoologiche	danno indicazioni sui popolamenti animali e sui loro spostamenti
	carte pedologiche	rappresentano i vari tipi di suolo
	carte antropologiche ed etnologiche	visualizzano la distribuzione dei tipi umani o dei popoli, delle lingue e delle religioni
	carte economiche	rappresentano la distribuzione e i caratteri dei fattori economici (materie prime, industrie, produzioni agricole, vie di comunicazione, commerci ecc.)
	carte storiche	individuano l'assetto politico del territorio nei vari periodi del passato
	carte demografiche	forniscono indicazioni sulla distribuzione e sulla variazione della popolazione

no classificate in fluviali, costiere, vulcaniche, glaciali ecc. Una carta geomorfologica, se studiata attentamente, permette di individuare i possibili cambiamenti del territorio: intensità e velocità dei processi erosivi che interessano i versanti di una valle, frequenza di frane, rischi di piena che interessano un fondovalle percorso da un fiume. Per questi motivi, sono particolarmente utili, per esempio, per la redazione dei piani regolatori comunali o dei progetti di bonifica.

● Le **carte pedologiche** rappresentano i **tipi di suolo**. In natura esistono moltissime varietà di suoli, che si differenziano fra loro per spessore, colore, composizione, proprietà fisiche e chimiche. Attraverso la consultazione delle carte pedologiche, è possibile scegliere i tipi di coltivazione più idonei a un particolare tipo di suolo, i metodi di irrigazione adeguati e la quantità d'acqua ottimale da erogare. Più in generale, le carte pedologiche offrono suggerimenti preziosi sulle migliori modalità d'uso del suolo, scegliendo, per esempio, le aree da destinare all'uso agricolo e quelle da adibire alla costruzione di case, di strade e in generale a opere urbane. All'agricoltura andranno riservati i suoli più profondi, più fertili, più facilmente irrigabili e lavorabili. All'uso urbano saranno destinati i terreni meno fertili, quelli più elevati rispetto ai corsi d'acqua e quindi più al sicuro da eventuali inondazioni.

Carte pedologiche

● Le **carte climatiche** danno informazioni sul **clima di una data regione**. Per esempio, sull'entità delle precipitazioni atmosferiche (pioggia e neve), sulla temperatura dell'aria, sulla direzione e l'intensità del vento, sulla durata e la persistenza della nebbia.

Carte climatiche

● Un particolare tipo di carta climatica è la **carta meteorologica**, che documenta la variazione del tempo. È una carta dinamica, che deve essere aggiornata ora per ora, soprattutto quando è impiegata per la navigazione aerea o marittima.

Carte meteorologiche

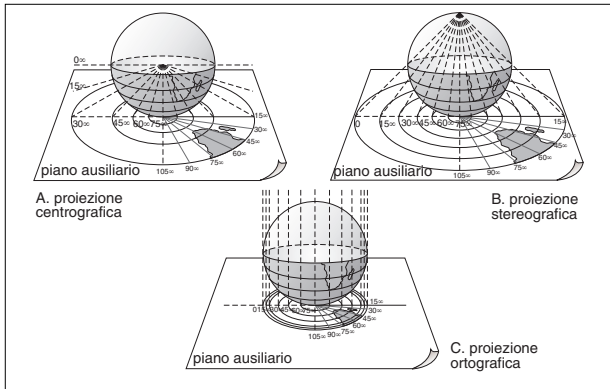
## 6.3 Le proiezioni geografiche

I vari sistemi, matematici o geometrici, utilizzati per riportare sul piano il reticolato geografico (che rappresenta la base per la costruzione di una carta), prendono il nome di proiezioni geografiche. Esse vengono classificate in vere, modificate e convenzionali.

Le **proiezioni vere** sono ottenute mediante il trasporto del reticolato geografico, eseguito con metodi geometrici, su una superficie ausiliaria, applicando i soli principi geometrici. Se questa superficie è un piano, si hanno le proiezioni prospettiche; se questa superficie corrisponde a quella di

Proiezioni vere

Proiezioni modificate	<p>un cilindro o di un cono, cioè di un solido sviluppabile su un piano, si hanno le proiezioni per sviluppo.</p> <p><b>Le proiezioni modificate</b> sono ottenute dalle precedenti apportando correzioni, attraverso l'applicazione di formule matematiche, così da diminuire inevitabili deformazioni.</p>
Proiezioni convenzionali	<p><b>Le proiezioni convenzionali</b>, dette più propriamente <b>rap-presentazioni</b>, richiedono, per la loro costruzione, il ricorso non alla geometria proiettiva, come nelle due precedenti, ma a relazioni matematiche con le quali si desidera ottenere particolari risultati.</p> <p>Qualunque sia il tipo di proiezione utilizzato per costruirla, una carta geografica si può considerare "esatta" se mantiene alcune caratteristiche:</p>
Isogonia	<p>● <b>isogonia</b>, per cui gli angoli esistenti fra linee tracciate sulla superficie terrestre sono conservati identici sulla carta;</p>
Equivalenza	<p>● <b>equivalenza</b>, per cui l'area di ogni singola maglia del reticolato tracciata sulla carta risulta proporzionale all'area della corrispondente maglia terrestre;</p>
Equidistanza	<p>● <b>equidistanza</b>, per cui le distanze corrispondenti sulla carta e nella realtà si mantengono proporzionali. Nessuna carta, però, può avere nello stesso tempo le tre caratteristiche. Per questo, nella realizzazione di una carta, si sceglie la caratteristica più adatta all'uso a cui la carta è destinata. Per le carte geografiche comunemente usate si sceglie di norma la proiezione equivalente, nella quale vengono rispettate le proporzioni tra le varie parti della superficie terrestre. Per le carte nautiche si preferisce la proiezione isogonica, che mantiene immutate le forme delle terre e gli angoli formati dall'intersezione delle linee di rotta con i meridiani e i paralleli. Per le carte degli atlanti si usano spesso le proiezioni equidistanti.</p>
Proiezioni prospettiche:	<p>■ <b>Proiezioni vere</b></p> <p>● <b>Proiezioni prospettiche</b>. Si ottengono immaginando di proiettare un emisfero, o una sua parte, su un piano tangente o secante il globo terrestre. A seconda del punto di tangenza del piano, la proiezione viene detta <b>polare</b> (piano tangente a uno dei due poli), <b>equatoriale</b> (piano tangente a un punto dell'equatore) od <b>obliqua</b> (tangente a un altro punto qualsiasi della superficie terrestre). Considerando, invece, la posizione del punto di vista, cioè il punto da cui si immagina che fuoriescano le visuali, le proiezioni possono essere definite centrografiche, stereografiche oppure ortografiche (fig. 6.2).</p>
centrografiche	<p>Nelle proiezioni <b>centrografiche</b> il punto di vista si trova al centro della Terra; il difetto di una carta costruita con que-</p>



**Figura 6.2.**  
Diversi tipi di proiezioni  
di sviluppo.

sto metodo è che la proporzionalità fra distanze reali e cartografate diminuisce con l'aumentare della distanza di un punto della superficie terrestre dal punto di tangenza.

Nelle proiezioni **stereografiche** il punto di vista è situato sulla superficie terrestre e opposto rispetto a quello di tangenza del piano. Le distanze fra i paralleli non sono proporzionali a quelle reali, ma l'errore è meno accentuato rispetto alla proiezione precedente.

Nelle proiezioni **ortografiche** il punto di vista è situato all'infinito e i raggi di proiezione sono paralleli. I paralleli risultano tanto più ravvicinati quanto più ci si allontana dal punto di tangenza.

● **Proiezioni di sviluppo.** Si ottengono sviluppando in un piano la superficie curva (cilindro o cono) su cui in precedenza si è immaginato di proiettare la superficie della Terra (fig. 6.3). Queste proiezioni, dette cilindriche o coniche, possono essere distinte in tangenti o secanti (a seconda che la superficie cilindrica o conica sia tangente o secante la superficie terrestre), dirette (se l'asse del cilindro o del cono coincide con quello terrestre), inverse (se l'asse del cilindro o del cono coincide con il piano dell'equatore) od oblique (se l'asse del cilindro o del cono è in una posizione diversa dalle precedenti). A titolo di esempio, si descrivono le proiezioni di sviluppo **tangenti dirette**.

Nella **proiezione cilindrica** la superficie laterale del cilindro è tangente all'equatore. I meridiani sono rappresentati da linee parallele, equidistanti e perpendicolari all'equatore, mentre i paralleli sono rappresentati da rette uguali e parallele all'equatore, che si avvicinano progressivamente in direzione dei poli (a causa della curvatura della Terra). La proie-

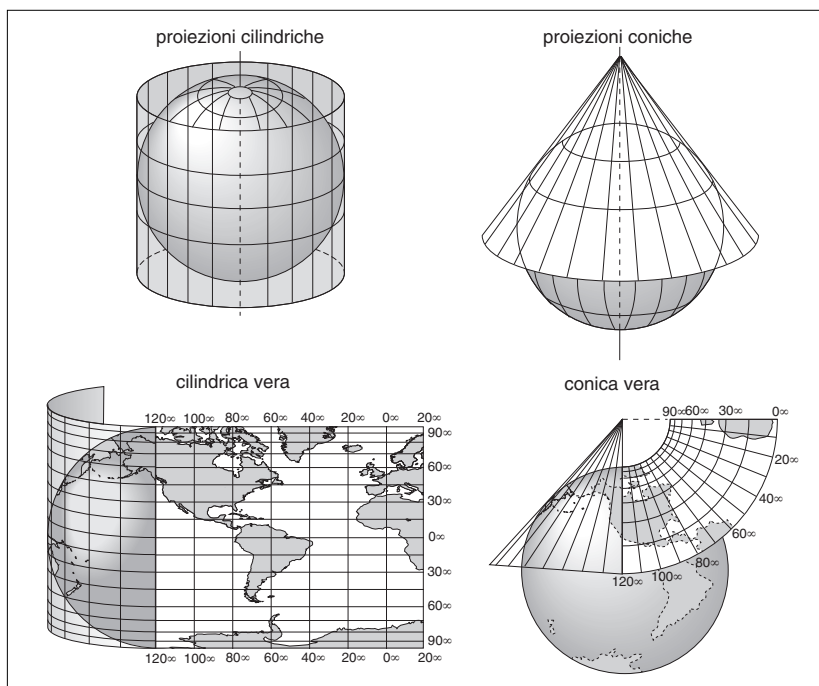
stereografiche

ortografiche

Proiezioni  
di sviluppo:

cilindrica





**Figura 6.3**  
Esempi di proiezioni  
di sviluppo.

zione, sviluppata sulla superficie ausiliaria, si presenta come un reticolato composto da maglie rettangolari di dimensioni variabili con la latitudine, cioè sempre più piccole via via che ci si avvicina ai poli. Tale proiezione è equivalente ed equidistante solo lungo l'equatore. La deformazione è minima per le regioni equatoriali, lungo la linea di tangenza, e aumenta invece per le regioni polari: i due poli, che sulla Terra sono due punti, sulla carta sono rappresentati da linee lunghe tanto quanto l'equatore.

Nella **proiezione conica** il cono, all'interno del quale si deve supporre di collocare la sfera terrestre, è tangente lungo un parallelo. Dopo lo sviluppo in piano, il reticolato è composto da meridiani rettilinei e divergenti a ventaglio dal polo e dai paralleli, rappresentati da archi di circonferenze concentriche. È la zona a cavallo del parallelo di tangenza a essere rappresentata con maggiore precisione. La proiezione è equidistante solo lungo la linea di tangenza.

conica

## ■ Proiezioni modificate

La più nota è la **proiezione isogona di Mercatore**, nome italianizzato di Gerhardus Kremer (1512-1594), matematico, geografo e cartografo fiammingo, ottenuta da una proiezione cilindrica tangente all'equatore, in modo da ottenere una carta isogonica, equivalente lungo l'equatore e in cui le deformazioni sono elevate alle alte latitudini. I meridiani e i paralleli sono rappresentati da due fasci di rette parallele tra loro ortogonali, ma, mentre i meridiani si mantengono tra loro equidistanti, i paralleli si distanziano sempre più andando dall'equatore verso i poli. Su di essa è possibile tracciare la **linea lossodromica** (linea congiungente due punti, che taglia tutti i meridiani secondo uno stesso angolo) come una linea retta, mentre nella realtà essa è rappresentata da una linea curva, data la sfericità terrestre. Questa proiezione è utile per la costruzione di carte nautiche, in quanto gli angoli di intersezione tra i meridiani e la linea lossodromica si mantengono costanti per tutta la rotta (fig. 6.4).

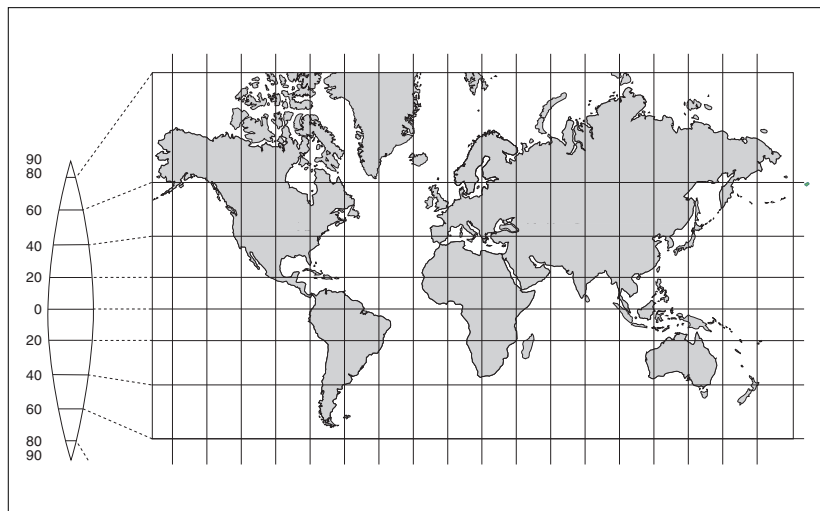
Proiezione  
di Mercatore

La linea  
lossodromica

## ■ Proiezioni convenzionali

Possono essere suddivise in **pseudocilindriche** e **pseudoconiche**, che presentano analogie con le proiezioni cilindriche e coniche, e discontinue, dette anche interrotte, nelle quali si ricorre contemporaneamente a proiezioni diverse per rappresentare varie parti della superficie terrestre.

**Figura 6.4**  
Proiezione isogona  
di Mercatore.



## PROIEZIONE TRASVERSA DI MERCATORE E SISTEMA UTM

La proiezione cilindrica trasversa di Mercatore, nota anche come proiezione conforme di Gauss, è alla base del sistema UTM (Universale Trasversa di Mercatore), adottato oggi a livello internazionale e utilizzato attualmente dall'Istituto Geografico Militare di Firenze per la costruzione della Carta Topografica d'Italia.

È una proiezione convenzionale pseudocilindrica, costruita immaginando di avvolgere l'ellissoide terrestre con la superficie laterale di un cilindro, tangente non lungo l'equatore, ma lungo un meridiano (meridiano centrale) della parte di superficie che deve essere rappresentata. Per esempio, per la cartografia italiana si fa riferimento al meridiano di Monte Mario, che passa per la città di Roma, situato a est del meridiano di Greenwich, meridiano fondamentale a livello internazionale, di longitudine 0°.

Sviluppando la superficie cilindrica su un piano, l'equatore e il meridiano di tangenza sono rappresentati da linee rette fra loro ortogonali; gli altri paralleli e meridiani appaiono come linee curve, simmetriche rispettivamente al meridiano centrale e al-

l'equatore. Questo tipo di rappresentazione è equidistante lungo il meridiano di tangenza ed elimina il problema della deformazione alle alte latitudini; tuttavia, forti sono le deformazioni allontanandosi dal meridiano centrale (il massimo di longitudine accettabile, oltre il quale le deformazioni non sono più tollerabili, è 6°, cioè 3° a est e 3° a ovest del meridiano centrale).

Il **sistema cartografico UTM** considera la Terra divisa in 60 fusi, ampi 6° di longitudine ciascuno, numerati da 1 a 60 a partire dall'antimeridiano di Greenwich e procedendo verso est.

La superficie terrestre è stata anche suddivisa in 20 fasce di 8° di latitudine da 80° Nord a 80° Sud, contraddistinte da lettere maiuscole dell'alfabeto inglese (escludendo le lettere I e O, che avrebbero potuto generare ambiguità con i numeri 1 e 0).

Dall'intersezione dei fusi e delle fasce si generano 1200 zone, a loro volta suddivise in quadrati di 100 km di lato, contrassegnati da due lettere maiuscole. L'Italia è compresa nelle zone 32T, 33T, 34T, 32S, 33S, 34S.

Proiezione trasversa  
di Mercatore

Tra le proiezioni pseudocilindriche, la più nota è la **proiezione trasversa di Mercatore** (v. riquadro); le proiezioni pseudoconiche comprendono, invece, le policoniche e le policentriche, per la cui realizzazione si utilizzano più superfici di proiezione.

## 6.4 Come si costruisce una carta geografica

La costruzione di una carta geografica è un'operazione assai delicata, che comprende due diverse fasi: la triangolazione e il rilevamento topografico.

### ■ Triangolazione

Con questa operazione si stabilisce precisamente la **posizione di alcuni punti sul terreno**, non allineati tra loro, e ciò si ottiene utilizzando la nota **proprietà geometrica secondo la quale, conoscendo un lato e due angoli di un triangolo, possono venire determinati tutti gli altri parametri**. Si

fissa sul terreno un certo numero di punti (per esempio, cima di un monte o di un campanile), visibili tra loro a tre a tre e se ne stabiliscono altitudine e coordinate geografiche; quindi si misura la distanza fra due di questi punti (posti al massimo a qualche chilometro di distanza), distanza che viene poi riportata in scala sulla carta: questo segmento costituisce la **base geodetica**, a partire dalla quale si costruisce un reticolo di maglie triangolari, detto **rete di triangolazione**, o **geodetica**.

Base e rete  
geodetica

## ■ Rilevamento topografico

Fatta la triangolazione, il rilevamento del terreno, detto anche topografico, ha lo scopo di stabilire la posizione, l'altitudine e le distanze del maggior numero di punti contenuti nei triangoli tracciati in precedenza; inoltre, si descrivono le caratteristiche del terreno e la posizione dei principali elementi topografici naturali (per esempio, fiumi) e artificiali (ponti, strade, edifici ecc.). Questa operazione, che fino ad alcuni decenni fa si svolgeva sul suolo, è oggi sostituita dall'aerofotogrammetria e dal telerilevamento, metodi assai più rapidi ed efficienti.

L'**aerofotogrammetria** è basata sulla ripresa di foto da parte di velivoli. Durante il volo, a intervalli di tempo ravvicinati (da punti di vista non molto distanti), vengono scattate fotografie orizzontali del terreno. La strisciata fotografica produce una serie di fotografie sovrapponibili: tramite uno strumento, lo stereoscopio, si fondono a due a due, dando origine a una visione tridimensionale della zona fotografata, e si giunge così a un disegno preliminare della carta.

Aerofotogrammetria

Il **telerilevamento** utilizza strumenti montati a bordo di **satelliti artificiali**, che ruotano a centinaia di chilometri dal suolo. Il rilevamento della superficie terrestre viene effettuato attraverso l'analisi di radiazioni infrarosse, visibili o ultraviolette, emesse da oggetti al suolo, raccolte dal satellite, codificate e in seguito trasmesse via radio a stazioni di ricezione a terra, dove sono elaborate e trasformate in immagini al computer o in vere e proprie fotografie.

Telerilevamento

Questo metodo presenta rispetto agli altri una serie di vantaggi:

Vantaggi  
del telerilevamento

- **ogni immagine copre vasti spazi**, per cui è possibile avere una visione d'insieme immediata e sintetica di fenomeni e processi. Un'immagine prodotta subito dopo un terremoto o un'inondazione permette di pianificare rapidamente, e su vasta scala, i primi interventi, molto più, per esempio, di un'esplorazione condotta sul terreno, che necessariamente sarebbe molto più lenta;
- **è possibile avere più immagini della stessa area**, a pochi

giorni di distanza l'una dall'altra, ogni volta che il satellite artificiale passa al di sopra di quell'area. Ciò permette di tenere un particolare evento sotto osservazione pressoché continua e di coordinare eventuali interventi. Ciò è utile, per esempio, per sorvegliare il ciclo vegetativo di molti prodotti agricoli: in caso di difficoltà nella crescita o nella maturazione, si può programmare anticipatamente un'azione di irrigazione o un intervento antiparassitario;

● poiché le immagini sono elettroniche, possono essere elaborate nei modi più diversi.

## GLOSSARIO

### **Carta geografica**

Rappresentazione ridotta, approssimata e simbolica di tutta o parte della superficie terrestre.

### **Curve di livello**

Linee che uniscono i punti del terreno che hanno la stessa quota. Dette anche isoipse, si ottengono immaginando di intersecare la superficie topografica mediante piani orizzontali, tra loro paralleli e disposti con dislivello costante; tra due curve di livello successive il dislivello è pertanto fisso e viene detto equidistanza.

### **Fotogrammetria**

Metodo di rilevamento topografico per mezzo di fotografie. Stabilite con esatta grandezza le coordinate dei punti fondamentali, si fotografa la zona da rappresentare da punti di vista diversi, o più comunemente da un aeroplano che voli a quota costante e scatti fotografie che in parte si sovrappongano.

### **Geodesia**

Scienza che si occupa della determinazione della forma e delle dimensioni della Terra, o meglio della forma e dimensioni

del geoide, superficie luogo dei punti nei quali è costante il valore dell'accelerazione di gravità.

### **Isolinee**

Termine generale per indicare quelle linee che uniscono tutti i punti in cui può essere riscontrato uno stesso valore. Si definisce isoipsa (*isos*, uguale; *hypsos*, altura) la linea chiusa che unisce tutti i punti del terreno aventi la stessa altezza sul livello medio del mare. Nel caso in cui le curve di livello rappresentano le profondità marine o lacustri, si usa il termine isobate (*isos*, uguale e *bàthos*, profondità).

### **Legenda**

Spiegazione dei simboli presenti su una carta geografica, riportata direttamente sulla carta stessa.

### **Scala numerica**

Esprime il rapporto numerico fra la distanza reale fra due punti e quella rappresentata su una carta geografica.

### **Triangolazione**

Metodo per determinare il reticolo di fondo per la costruzione delle carte topografiche.

## TEST DI VERIFICA

**1 Per rappresentare un intero continente si utilizzano in particolare:**

- a** le carte geografiche;
- b** le carte topografiche;
- c** le carte corografiche;
- d** i planisferi.

**2 Una carta topografica ha come caratteristica specifica:**

- a** una scala molto piccola;
- b** è adatta a rappresentare centri urbani;
- c** una forma sferica;
- d** è adatta a rappresentare l'uso e l'organizzazione del territorio.

**3 Una proiezione è isogona quando:**

- a** conserva identici gli angoli del reticolo geografico;
- b** mantiene costante il rapporto lineare di meridiani e paralleli;
- c** mantiene la proporzionalità fra le aree cartografate e quelle reali.

**4 In una proiezione centrografica:**

- a** il punto di proiezione risulta dalla parte opposta rispetto al punto di proiezione;
- b** il punto di proiezione risulta al centro della sfera;
- c** il centro di proiezione è posto in un polo;
- d** il centro è posto in un punto qualsiasi della Terra.

**5 Nella proiezione cilindrica di Mercatore i meridiani sono:**

- a** linee immaginarie;
- b** rette parallele;
- c** linee curve passanti per i poli;
- d** nessuna delle precedenti.

**6 Le carte tematiche:**

- a** non sono carte derivate;
- b** rappresentano la distribuzione spaziale di determinati fenomeni;
- c** rappresentano i tipi di roccia;
- d** rappresentano i tipi di suoli.

**7 Le carte tematiche climatiche possono fornire informazioni su:**

- a** entità di precipitazioni piovose e nevose;
- b** temperatura dell'aria;
- c** direzione e intensità del vento;
- d** tutte e tre le alternative.

**R**

1 c; 2 d; 3 a; 4 b; 5 b; 6 b; 7 d.

# 7 Materiali della crosta terrestre

La **materia** è costituita da atomi di diversi **elementi**, sostanze semplici che si distinguono tra loro per il differente **numero atomico** e che possono combinarsi per formare vari **composti**.

In natura, la materia si presenta in diversi **stati di aggregazione**: solido, liquido e gassoso. I **minerali** e le **rocce**, sostanze allo stato solido, sono i componenti della crosta terrestre e il loro studio tramite la **mineralogia** e la **petrografia** ci permette di acquisire le basi per la comprensione dei vari fenomeni geologici.

## 7.1 Sostanze, elementi e composti

Tutto ciò di cui siamo fatti e che ci circonda, da un semplice sasso all'intera crosta terrestre, è **materia** e risulta dall'aggregazione di piccolissime unità costitutive, dette **atomi**, formate a loro volta da particelle di dimensioni ancora inferiori, protoni, neutroni ed elettroni (v. riquadro).

Sostanze

In natura esistono 92 tipi di atomi differenti e, dalle loro svariate combinazioni attraverso reciproche forze attrattive dette legami chimici, si originano le **sostanze**, tipi di materia che presentano determinate caratteristiche fisiche e una precisa composizione chimica. Una sostanza costituita da atomi dello stesso tipo è un **elemento chimico** (detto anche sostanza elementare); per esempio, il diamante è formato da atomi di carbonio, il ferro da atomi di ferro, il sodio da atomi di sodio ecc. Possiamo allora **definire atomo la più piccola parte di un elemento che ne conserva tutte le caratteristiche** e che rimane inalterata nelle reazioni chimiche. Una sostanza formata da due o più atomi di elementi differenti è un **composto chimico** (o sostanza composta). I composti si suddividono in due grandi categorie: **composti inorganici**, costituenti la crosta terrestre (acqua, aria, minerali, rocce), e **composti organici**, presenti soprattutto negli organismi viventi (e che da essi vengono prodotti). Talvolta, negli elementi e nei composti sono individuabili unità costitutive capaci di esistenza autonoma, dette **molecole**, formate da uno o più atomi uguali (negli elementi) o da due o più atomi diversi (nei composti). Le sostanze che hanno questa caratteristica sono dette aggregati molecolari (tali sono la maggior parte delle sostanze gassose e liquide e una parte delle sostanze solide). Negli aggregati molecolari i legami sono di tipo covalente (v. riquadro).

Elemento chimico

Composto chimico

Molecole

## ATOMI, ISOTOPI, IONI E LEGAMI CHIMICI

Gli atomi sono costituiti da tre tipi fondamentali di particelle subatomiche: protoni, con carica positiva unitaria; neutroni, elettricamente neutri, con massa leggermente maggiore rispetto a quella dei protoni; elettroni, con carica negativa unitaria e massa piccolissima (circa 1/1840 di quella del protone).

In condizioni normali, gli atomi sono elettricamente neutri, perché il numero dei protoni è esattamente bilanciato da quello degli elettroni.

Neutroni e protoni sono riuniti in un nucleo centrale; gli elettroni si muovono intorno al nucleo in regioni dello spazio dette orbitali, raggruppati in strati (o livelli energetici) a diverse distanze dal nucleo. Gli atomi di ogni elemento sono caratterizzati da due numeri:

- il **numero atomico** (A), pari al numero di protoni presenti nel nucleo (dal quale dipendono le particolari caratteristiche fisiche e di reattività chimica dell'elemento);

- il **numero di massa** (Z), pari alla somma del numero di neutroni e protoni presenti nel nucleo.

Per convenzione, il numero atomico è indicato dal deponente e il numero di massa dall'esponente, scritti alla sinistra del simbolo chimico.

Per gli atomi di uno stesso elemento, resta fisso il numero dei protoni, ma può variare quello dei neutroni: sono detti **isotopi** gli atomi di uno stesso elemento aventi lo stesso numero atomico, ma diverso numero di massa, poiché diverso è il numero dei neutroni presenti nel nucleo. Nella **tavola periodica** (v. riquadro a p. 100), gli isotopi (dal greco *isos*, uguale, e *topos*, luogo) occupano la stessa posizione. Molti sono gli elementi che possiedono due o più isotopi.

L'idrogeno, per esempio, ha tre isotopi: protio, deuterio e tritio; nel loro nucleo è presente un protone e, rispettivamente, nessuno, uno o due neutroni. Il carbonio ha sei isotopi:  $^{10}\text{C}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{14}\text{C}$  e  $^{15}\text{C}$ ,

con sei protoni e, rispettivamente, quattro, cinque, sei, sette, otto e nove neutroni.

Gli isotopi vengono distinti in stabili e instabili: in questi ultimi il nucleo, instabile, tende a raggiungere la stabilità emettendo radiazioni e l'isotopo si trasforma in un altro isotopo dello stesso elemento o in un isotopo di un elemento differente, dando luogo al fenomeno della **radioattività naturale** (per questo motivo gli isotopi instabili sono detti isotopi radioattivi, o radioisotopi).

In particolari condizioni, gli atomi possono perdere o acquistare elettroni, trasformandosi in ioni. Se un atomo perde elettroni, le cariche positive risultano in eccesso rispetto a quelle positive e diviene uno **ione positivo** (catione); se invece acquista elettroni, le cariche negative prevalgono ed esso viene detto **ione negativo** (anione).

Gli elettroni dello strato o livello più esterno degli atomi di un elemento (detti elettroni di valenza) ne determinano il comportamento chimico, in quanto sono quelli che entrano in gioco quando gli atomi di quell'elemento si uniscono tra loro o con atomi differenti, per mezzo di legami chimici. Prendono il nome di **legami chimici** le unioni tra atomi in cui intervengono forze attrattive fra nuclei ed elettroni di valenza.

I due tipi fondamentali di legame chimico sono il legame covalente e il legame ionico. Il **legame covalente** si forma tra atomi di uno stesso elemento, o di elementi differenti, che mettono in comune uno o più coppie di elettroni di valenza.

Il **legame ionico** si forma tra gli atomi di due elementi differenti tra i quali è avvenuto uno scambio di elettroni: un atomo cede uno o più elettroni e diventa uno ione positivo, l'altro acquista elettroni e diventa uno ione negativo. Il legame ionico è un'attrazione di natura elettrostatica che si stabilisce tra due ioni di carica opposta.



### Aggregati cristallini

Non sempre, tuttavia, lo stabilirsi di legami chimici tra atomi porta alla formazione di molecole. Tra le sostanze solide sono infatti abbastanza frequenti gli **aggregati cristallini ionici**, dove i legami chimici (di tipo ionico) interessano un numero imprecisabile di ioni (v. riquadro a p. 95), disposti secondo una struttura ordinata che si ripete regolarmente nello spazio, detta **reticolo cristallino** (non sono individuabili molecole vere e proprie, perché i legami ionici sono estesi all'intero edificio cristallino). Sostanze di questo tipo, dette anche composti ionici, sono caratteristiche dei minerali costituenti le rocce che formano la crosta terrestre.

### ■ Gli stati di aggregazione della materia

In natura la materia può presentarsi in tre diversi stati di aggregazione, solido, liquido e gassoso, a seconda dell'intensità delle forze di attrazione fra le particelle (ioni, atomi o molecole) che la formano.

### Stato solido

Nelle sostanze allo **stato solido**, le forze di attrazione fra le particelle sono elevatissime, tanto da mantenere queste ultime in posizioni fisse: in alcuni solidi le particelle sono disposte regolarmente, secondo uno schema geometrico ca-

## LA TAVOLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI

Fu il chimico russo Dmitrij Mendeleev (1834-1907) che per primo, nel 1869, cercò di ordinare gli elementi chimici allora noti in una tavola, detta tavola di Mendeleev, disponendoli in ordine crescente di peso atomico; egli riuscì inoltre a prevedere l'esistenza di elementi allora sconosciuti.

Tutti gli elementi chimici oggi noti sono stati ordinati per numero atomico crescente (anziché per peso atomico), in una tavola, detta tavola periodica degli elementi, o **sistema periodico**, molto simile a quella proposta da Mendeleev. Essa mette in evidenza come le proprietà chimiche e fisiche degli elementi variano in modo periodico al variare del loro numero atomico: si ha, cioè, il ripetersi di proprietà simili a intervalli regolari e ciò è dovuto alla distribuzione degli elettroni negli orbitali più esterni degli atomi.

Nel sistema periodico, gli elementi sono ordinati in 7 righe orizzontali, dette **periodi** (numerati da 1 a 7), e in 16 colonne

verticali, dette **gruppi** (numerati da I A a VIII A e da I B a VIII B). I gruppi riuniscono elementi con comportamento chimico affine (avendo lo stesso numero di elettroni di valenza). Alcuni dei gruppi A hanno denominazioni proprie: I A, metalli alcalini; II A, metalli alcalino-terrosi; VI A, calcogeni; VII A, alogeni; VIII A, gas nobili. Gli elementi dei gruppi B sono detti di transizione. Una linea più marcata separa, nella tavola periodica, gli elementi con caratteristiche metalliche (posti a sinistra della linea) da quelli con caratteristiche non metalliche (a destra della linea); alcuni elementi adiacenti alla linea possiedono caratteristiche intermedie (semimetalli). In natura i **metalli** sono tutti solidi (tranne il mercurio liquido), sono buoni conduttori di calore e di elettricità, sono lucenti, duttili e malleabili. I **non metalli** hanno caratteristiche isolanti: quelli solidi sono fragili, ma fra essi si trovano anche elementi allo stato gassoso e solo uno liquido, il bromo.

ratteristico (reticolo cristallino) e si parla allora di solido cristallino; in altri le particelle non sono disposte regolarmente e i solidi si dicono amorfi. Tra le particelle vengono esercitate delle forze, dette forze di coesione, che, data la loro intensità, conferiscono alla materia rigidità e compattezza. I solidi possiedono pertanto un volume e una forma propri e sono incompressibili.

Nelle sostanze allo **stato liquido**, l'intensità delle forze di attrazione tra le particelle è minore; queste ultime possono muoversi scorrendo le une sulle altre e cambiando continuamente posizione. Perciò, i liquidi possiedono un volume proprio, ma non una forma propria, che viene loro invece conferita dal recipiente che li contiene.

Stato liquido

Nelle sostanze allo **stato gassoso**, le forze di attrazione fra le particelle sono praticamente trascurabili, per cui queste ultime possiedono una mobilità elevatissima, che tende a far occupare loro tutto lo spazio disponibile. Pertanto, le sostanze gassose non hanno forma né volume propri e sono comprimibili.

Stato gassoso

## 7.2 I minerali

Con il termine **minerale** si indica una sostanza elementare o un composto inorganico di origine naturale, generalmente allo stato solido cristallino, formato da atomi di uno o più elementi chimici, presenti in proporzioni ben definite, la cui composizione è esprimibile attraverso una formula chimica e caratterizzati da proprietà fisiche ben definite.

Definizione di minerale

Attualmente si conoscono più di 2000 minerali, ma sono meno di una ventina quelli che si possono considerare abbondanti. Altri minerali, invece, non sono particolarmente rari, ma si rinvencono dispersi entro le rocce in concentrazioni assai basse. A seconda del loro interesse economico, può essere conveniente ricercare i luoghi in cui essi, grazie a condizioni favorevoli, si sono concentrati naturalmente (giacimenti), o anche procedere alla loro concentrazione artificiale, separandoli dal resto della roccia. La scienza che si occupa dello studio di questi materiali della crosta terrestre è la **mineralogia**; la struttura cristallina dei minerali è oggetto di studio della **cristallografia**.

Diffusione dei minerali

### ■ Il reticolo cristallino

Per la particolare bellezza di alcuni esemplari, i minerali hanno sempre incuriosito l'uomo, stimolandone la fantasia. Per esempio, gli antichi pensavano che il quarzo ialino, trasparente e incolore, minerale composto da silicio e ossigeno

Struttura del reticolo cristallino

( $\text{SiO}_2$ ), fosse formato da ghiaccio così compresso da non poter più essere fuso e trasformato in acqua. In seguito, anche quando si scoprì che in realtà il quarzo è un minerale, il nome “cristallo”, che significa “congelato”, continuò a essere usato e fu anzi esteso a tutti i solidi naturali le cui particelle elementari hanno una disposizione spaziale ordinata e regolare. La struttura spaziale ordinata dei costituenti di un cristallo prende il nome di **reticolo cristallino**. Quest’ultimo può essere pensato come formato dalla ripetizione, sempre uguale nelle tre direzioni dello spazio, di un’unità strutturale detta **cella elementare**, avente una forma geometrica semplice (per esempio, cubo o parallelepipedo). Ogni cella elementare è caratterizzata dalla lunghezza degli spigoli  $a$ ,  $b$ , e  $c$ , paralleli a tre assi di riferimento,  $x$ ,  $y$  e  $z$ , e dal valore degli angoli  $\alpha$  (alfa),  $\beta$  (beta) e  $\gamma$  (gamma), individuati, coppia a coppia, dai tre spigoli (costanti cristallografiche). In base alla lunghezza degli spigoli e al valore degli angoli, si individuano 14 diversi tipi di celle elementari, che vengono riunite in 3 diversi gruppi, monometrico, dimetrico e trimetrico, suddivisi in sette sistemi cristallini (tab. 7.1).

### ■ Proprietà fisiche dei minerali

Tra le numerose proprietà fisiche dei minerali, ne consideriamo alcune utili per la loro identificazione: forma dei cristalli, sfaldatura, frattura, lucentezza, colore, durezza e peso specifico.

Nuclei di cristallizzazione, grani e abito cristallino

Durante la **formazione dei cristalli**, processo detto cristallizzazione, si verifica il graduale accumularsi di particelle (ioni, atomi o molecole) intorno a raggruppamenti ordinati di dimensioni submicroscopiche, detti **nuclei di cristallizzazione**. Nella maggior parte dei casi, i cristalli dei minerali più comuni sono di piccole dimensioni (pochi millimetri) e hanno forme esterne estremamente irregolari, dette **grani**. Solo in condizioni particolarmente favorevoli, cioè quando esiste spazio sufficiente perché i singoli individui possano accrescersi liberamente, il cristallo assume la forma geometrica caratteristica, cioè l’**abito cristallino**.

Associazione di cristalli















Spesso, i cristalli di una stessa specie mineralogica non si presentano isolati, ma in **associazione di cristalli**, che nell’insieme assumono forme particolarmente caratteristiche. Le associazioni più note sono i **geminati**, in cui si osserva la compenetrazione di due o più individui, e ciò dimostra che essi sono “concresciuti”, cioè alcune parti del reticolo cristallino sono in comune ai cristalli (due o più) che formano il geminato.

Sfaldatura

La **sfaldatura** è la naturale tendenza di un minerale, quan-

do viene spezzato, a rompersi secondo direzioni preferenziali, in genere superfici piane che corrispondono alle direzioni lungo le quali si trovano i legami più deboli tra ioni o atomi nella struttura del cristallo; le miche (minerali silicatici), per esempio, si sfaldano in sottili lamine piane.

**Tabella 7.1** Gruppi e sistemi cristallini

GRUPPO	SISTEMA	COSTANTI CRISTALLOGRAFICHE	RETICOLO
<b>monometrico</b> $a = b = c$	cubico	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	 fondamentale  a corpo centrato  a facce centrate
	tetragonale	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	 fondamentale  a corpo centrato
<b>dimetrico</b> $a = b \neq c$	trigonale o romboedrico	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	 fondamentale
	esagonale	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	 fondamentale
	rombico	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	 fondamentale  a basi centrate  a corpo centrato  a facce centrate
<b>trimetrico</b> $a \neq b \neq c$	monoclinico	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90^\circ$	 fondamentale  a basi centrate
	triclinico	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	 fondamentale

Le 14 celle elementari e multiple a cui si rifanno i corpi solidi cristallini vengono raggruppate in 3 gruppi suddivisi in 7 sistemi, che si differenziano in base alla lunghezza  $a$ ,  $b$ ,  $c$  dei tre spigoli fondamentali  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  che essi formano tra loro.

Frattura	La <b>frattura indica la tendenza dei minerali a spezzarsi irregolarmente</b> , in modo casuale. Se la superficie di frattura appare liscia e incurvata, si parla di frattura concoide, tipica dell'opale e di alcune rocce di origine vulcanica (ossidiana), ma la maggior parte dei minerali possiede un tipo di fatturazione irregolare.
Lucentezza	La <b>lucentezza indica lo splendore superficiale del minerale</b> e dipende dal modo in cui la sua superficie riflette la luce. Si distingue in lucentezza metallica, simile a quella offerta da una superficie di un metallo lucidato, e non metallica, quando può essere descritta facendo riferimento ad altre sostanze: si parla, per esempio, di lucentezza vitrea, adamantina, perlacea, sericea o resinosa; i minerali che non manifestano alcuna lucentezza si dicono terrosi.
Colore	Il <b>colore</b> è una caratteristica molto evidente, ma non altrettanto indicativa per il riconoscimento. È dovuto alla composizione chimica; tuttavia, spesso lo stesso minerale può presentarsi con colorazioni anche molto diverse in funzione della presenza o assenza di impurità, cioè altri elementi chimici, presenti, per esempio, in forma di inclusioni gassose o liquide.
Durezza	<b>Si definisce durezza la resistenza che un minerale oppone a essere scalfito</b> ; si tratta di una proprietà legata alle forze di coesione che "tengono unite" tra loro le particelle del cristallo: maggiore è l'intensità di questa forza, più elevato è il grado di durezza del minerale. È una proprietà relativa, che viene determinata empiricamente scalfendo un minerale di durezza sconosciuta con uno di durezza nota. La <b>scala di Mohs</b> , ideata dal mineralogista viennese F. Mohs (1773-1830), indica la durezza di un minerale con un numero compreso tra 1 (minerale più tenero) e 10 (minerale più duro). In essa, un minerale di una certa durezza viene scalfito da quello di durezza superiore e a sua volta scalfisce tutti quelli di durezza inferiore. Si dicono teneri i minerali con durezza 1 (come il talco) e 2 (come il gesso), che sono scalfibili con un'unghia; semiduri quelli con durezza compresa tra 3 e 5, che sono scalfibili con una punta d'acciaio; duri quelli con durezze comprese tra 6 e 10, non scalfibili da una punta d'acciaio (tab. 7.2). La durezza dei minerali non è la stessa su tutte le facce del cristallo; di solito, però, la variazione risulta molto bassa e quindi trascurabile.
Peso specifico	Il <b>peso specifico</b> esprime il rapporto fra il peso di un dato volume del minerale e il peso di un uguale volume di acqua distillata a 4 °C. Il peso specifico dei minerali varia da 1 a 23, ma per la gran parte di essi il valore oscilla tra 2,6-2,7; alcuni minerali metallici possiedono peso specifico 2 o 3 volte maggiore.

**Tabella 7.2** Scala delle durezza di Mohs

DUREZZA	MINERALE
1	talco
2	gesso
3	calcite
4	fluorite
5	apatite
6	ortoclasio
7	quarzo
8	topazio
9	corindone
10	diamante

### 7.3 Classificazione dei minerali

Non tutti i minerali sono ugualmente frequenti in natura: le specie dei minerali comuni, che formano i costituenti fondamentali delle rocce, sono relativamente poche; gran parte delle specie conosciute è, invece, assai rara, o perché in esse sono presenti elementi chimici scarsamente diffusi in natura, o perché raramente si realizzano le condizioni adatte alla loro formazione. **A costituire la maggior parte dei minerali concorrono, in pratica, soltanto otto elementi**, i quali rappresentano oltre il 98% (in peso) della crosta terrestre. Osservando la tabella 7.3 si nota come i due elementi più abbondanti siano il silicio e l'ossigeno, che da soli formano il 74,3% in peso sul totale degli elementi presenti sulla Terra. In base alla loro composizione chimica, **i minerali vengono classificati in otto gruppi**; a eccezione degli elementi nativi, il nome degli altri gruppi fa riferimento al tipo di ione negativo (anione) in essi presente (tab. 7.4).

- **Elementi nativi.** Sono così chiamati i minerali formati da un solo elemento chimico, che in natura si trovano da soli, non combinati con altri elementi (per esempio, rame, oro, zolfo, diamante e grafite, entrambi formati da carbonio). Elementi nativi
- **Solfuri.** In questi minerali lo ione  $S^{2-}$  (solfuro) è combinato con diversi ioni positivi; molti minerali di questo gruppo sono importanti per l'estrazione di metalli: per esempio, la galena,  $PbS$  (estrazione di piombo) e la blenda,  $ZnS$  (estrazione di zinco). Solfuri
- **Alogenuri.** Vengono così chiamati i minerali in cui lo ione negativo è rappresentato da un alogeno (elementi del gruppo VII A nella tavola periodica); comprendono i cloruri (con- Alogenuri

**Tabella 7.3** Elementi più abbondanti sulla Terra

ELEMENTO		PERCENTUALE APPROSSIMATIVA IN PESO
ossigeno	O	46,6
silicio	Si	27,7
alluminio	Al	8,1
ferro	Fe	5,0
calcio	Ca	3,6
sodio	Na	2,8
potassio	K	2,6
magnesio	Mg	2,1

**Tabella 7.4** Classificazione dei minerali

elementi nativi
solfuri
alogenuri
ossidi
carbonati
solfati
fosfati
silicati

tenenti l'alogeno cloro), tra cui ricordiamo il salgemma, NaCl, il comune sale da cucina.

**Ossidi** ● **Ossidi.** In questo gruppo lo ione negativo è rappresentato dall'ossigeno,  $O^{2-}$ , combinato con diversi ioni positivi. Essi rappresentano il gruppo più importante per la produzione di alcuni metalli, tra cui il ferro (estratto dai minerali ematite,  $Fe_2O_3$ , e magnetite,  $Fe_3O_4$ ).

**Carbonati** ● **Carbonati.** Lo ione  $(CO_3)^{2-}$ , carbonato, si combina con diversi ioni positivi: alcuni rappresentanti di questo gruppo sono la calcite (carbonato di calcio,  $CaCO_3$ ) e la dolomite, carbonato doppio di calcio e magnesio,  $CaMg(CO_3)_2$ . I carbonati costituiscono un gruppo di minerali molto importante, poiché sono i costituenti fondamentali di rocce sedimentarie, calcaree e dolomitiche. La loro presenza nelle rocce è facilmente riconoscibile con l'acido cloridrico: una goccia di acido cloridrico diluito, lasciato cadere su una roccia che contiene carbonati, sviluppa effervescenza, poiché si libera il gas anidride carbonica.

**Solfati** ● **Solfati.** Contengono lo ione  $(SO_4)^{2-}$ , solfato, combinato con diversi ioni positivi. Tra essi ricordiamo il gesso (solfato di calcio idrato,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ), che si forma per precipitazione chimica a seguito dell'evaporazione dell'acqua in zone di mare chiuso o in laghi salati.

**Fosfati** ● **Fosfati.** Gruppo di minerali che contiene lo ione  $(PO_4)^{3-}$ , fosfato, combinato con diversi ioni positivi. Costituiscono un gruppo di minerali usati per la produzione di fertilizzanti; il più importante è l'apatite,  $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$ .

### ■ Silicati

I silicati da soli rappresentano il 92% in volume della crosta terrestre. In tutti i silicati l'edificio cristallino fondamentale è rappresentato da un tetraedro  $(SiO_4)^{4-}$ , con al cen-

tro uno ione silicio ( $\text{Si}^{4+}$ ) legato a 4 ioni ossigeno ( $\text{O}^{2-}$ ) posti ai vertici. A seconda di come i tetraedri sono disposti nel reticolo cristallino, si distinguono nesosilicati, sorosilicati, inosilicati, fillosilicati e tectosilicati (tab. 7.5).



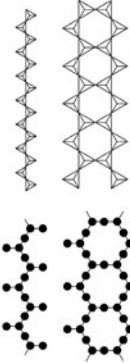

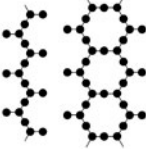
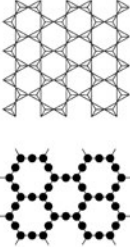

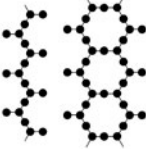

Il nome dei **nesosilicati** deriva dal greco *nésos*, isola, in quanto i tetraedri ( $\text{SiO}_4$ ) $^{4-}$  sono isolati e tra loro legati da ioni metallici. Fa parte dei nesosilicati l'**olivina**, un silicato di ferro e magnesio: i tetraedri di silicio e ossigeno si presentano isolati e le cariche negative in eccesso dello ione silicato, ( $\text{SiO}_4$ ) $^{4-}$ , sono bilanciate da ioni positivi come ferro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) e magnesio ( $\text{Mg}^{2+}$ ): la sua struttura risulta compatta e a elevata densità. Si riconosce per il colore verde scuro; la frattura è irregolare.

Il nome dei **sorosilicati** deriva dal greco *sorós*, mucchio, in quanto i tetraedri sono uniti per i vertici e formano un gruppo chiuso ad anello e ioni metallici collegano tra loro diversi gruppi di tetraedri; appartiene a questo gruppo il berillo, ( $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$ ), utilizzato come gemma nella varietà acquamarina.

Nesosilicati

Sorosilicati

**Tabella 7.5** Struttura delle varie classi di silicati

NESOSILICATI		CICLOSILICATI		FILLOSILICATI	
SOROSILICATI		INOSILICATI		TECTOSILICATI	
<p>○ = silicio ● = ossigeno unità <math>[\text{SiO}_4]^{4-}</math></p> 					
					
					



Ciclosilicati	Nei <b>ciclosilicati</b> i tetraedri sono uniti a formare anelli triangolari, quadrangolari o esagonali, o doppi anelli esagonali, che includono il berillo e la tormalina.
Inosilicati	Negli <b>inosilicati</b> i tetraedri sono uniti a formare delle catene (in greco <i>ínós</i> , catena), che possono essere singole o doppie; importanti rappresentanti di questo gruppo sono gli <b>anfiboli</b> e i <b>pirosseni</b> , che formano individui prismatici, con una struttura lineare allungata legata da ioni metallici (di magnesio, ferro, calcio e alluminio).
Fillosilicati	Nei <b>fillosilicati</b> i tetraedri sono uniti a formare uno strato (in greco <i>fillon</i> , foglia); di essi fanno parte le <b>miche</b> e i minerali delle <b>argille</b> , la cui struttura è appiattita, lamellare, atta a formare strati continui che si dispongono paralleli tra loro e possono essere facilmente separati l'uno dall'altro.
Tectosilicati	Il nome dei <b>tectosilicati</b> deriva dal greco <i>tectoniché</i> , architettura; sono uniti tra loro per i quattro vertici e formano strutture tridimensionali: ne sono esempi il <b>quarzo</b> e i <b>feldspati</b> . Il quarzo è formato soltanto da silicio e ossigeno. Ogni tetraedro mette in comune quattro atomi di ossigeno con i tetraedri vicini, formando una struttura continua tridimensionale. Si distingue dagli altri minerali per il suo aspetto vetroso, traslucido, e si frattura in modo irregolare. Se in una configurazione tridimensionale di tetraedri (come quella del quarzo) qualche ione $\text{Si}^{4+}$ viene sostituito da uno ione alluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ), si genera la struttura dei feldspati. La sostituzione di ioni silicio con ioni di alluminio introduce uno squilibrio di cariche, che verrà riequilibrato con altri ioni metallici. Se l'equilibrio viene stabilito tramite ioni potassio, si genera il feldspato potassico, od ortoclasio; se interviene lo ione sodio o lo ione calcio si ottengono i plagioclasii.
Silicati sialici e silicati femici	Infine, i silicati si possono distinguere in sialici e femici. I <b>silicati sialici</b> (dalle iniziali degli elementi presenti, silicio e alluminio) sono minerali chiari e relativamente leggeri, a differenza dei <b>silicati femici</b> (dalle iniziali di ferro e magnesio), che possiedono colore scuro e una maggiore densità.

## 7.4 La formazione dei minerali

Minerogenesi magmatica

Il processo di formazione dei minerali è detto **minerogenesi** e può avvenire secondo quattro modalità diverse.

Nella **minerogenesi magmatica** i minerali si formano per solidificazione dei componenti liquidi del magma (massa fluida e incandescente presente all'interno della Terra), conseguente al suo raffreddamento mentre risale in superficie; il passaggio da liquido a solido cristallino avviene in tempi e a temperature diverse. In questo modo si forma, per esempio, il quarzo.

Nella **minerogenesi per sublimazione** alcune sostanze aeriformi (gas e vapori) emesse nelle zone vulcaniche passano direttamente dallo stato aeriforme a quello solido cristallino per sublimazione; in questo modo si forma, per esempio, lo zolfo.

Minerogenesi  
per sublimazione

Nella **minerogenesi da soluzione** l'acqua marina è una soluzione in cui sono disciolti numerosi sali, che si depositano se la loro concentrazione aumenta quando, in seguito all'evaporazione dell'acqua, si raggiunge il loro limite di solubilità (quantità massima di soluto che può sciogliersi in 100 g di solvente a una determinata temperatura); si originano in questo modo il gesso e il salgemma.

Minerogenesi  
da soluzione

La **minerogenesi per trasformazione** di altri minerali può avvenire per cambiamento della struttura cristallina di un minerale, conseguente a elevate pressioni o temperature (così il diamante può trasformarsi in grafite), o per cambiamento della composizione chimica in seguito a reazioni chimiche che portano alla perdita o all'acquisto di alcuni elementi: per esempio, dal gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) può originarsi lo zolfo (S).

Minerogenesi  
per trasformazione

## 7.5 Le rocce

Raramente i minerali si trovano isolati sulla crosta terrestre; più **spesso i minerali formano aggregati, a cui si dà il nome di rocce**. La maggior parte delle rocce è eterogenea, cioè composta da diversi minerali: tra questi si distinguono **minerali fondamentali**, presenti in maggior percentuale, e **minerali accessori**, che si trovano in percentuale assai modesta e non sono utili per l'identificazione della roccia; solo poche rocce sono omogenee, formate, cioè, da un unico minerale. La grande varietà di rocce presenti sulla crosta terrestre viene classificata in base all'**origine**, oltre che in base alla composizione mineralogica.

Le rocce sono  
aggregati di minerali

Facendo riferimento alla loro origine, le rocce vengono suddivise in tre grandi gruppi: rocce ignee, sedimentarie e metamorfiche.

Classificazione

Le **rocce ignee, o magmatiche**, derivano dal raffreddamento e dalla solidificazione del magma, massa fluida ad altissima temperatura proveniente dall'interno della Terra e spinta verso l'esterno.

Rocce ignee

Le **rocce sedimentarie** si originano per sedimentazione di materiali di varia provenienza, quali frammenti derivanti dalla degradazione di tutte le rocce della crosta terrestre, resti di organismi viventi o sali disciolti nelle acque e poi precipitati in seguito a evaporazione dell'acqua.

Rocce sedimentarie

**Rocce metamorfiche** Le **rocce metamorfiche** derivano dal metamorfismo, cioè una profonda trasformazione di rocce preesistenti, provocato da un aumento di temperatura e di pressione a cui le rocce vengono sottoposte in seguito ai movimenti ai quali è soggetta la crosta terrestre (movimenti tettonici). Nel corso delle ere geologiche, le rocce non si mantengono inalterate, ma subiscono continuamente l'azione di fenomeni che provocano la trasformazione di un gruppo di rocce in un altro: si compie cioè, in tempi lunghissimi, un **ciclo di trasformazione delle rocce** detto ciclo litogenetico (v. riquadro).

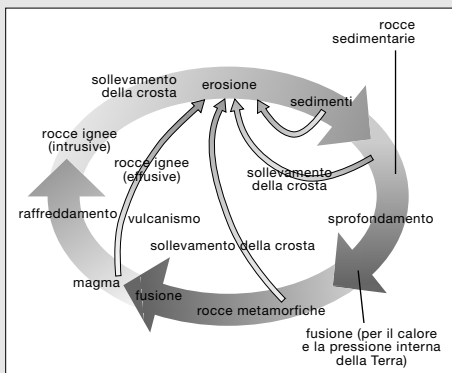
## CICLO LITOGENETICO

Per quanto resistenti ci possano sembrare, le rocce non sono immutabili, ma in tempi lunghissimi subiscono trasformazioni che ne riciclano continuamente i materiali. L'insieme di queste trasformazioni costituisce il ciclo litogenetico (fig. A).

Le rocce metamorfiche (v. cap. 10) e quelle ignee (v. cap. 8), a contatto con l'atmosfera terrestre, sono sottoposte all'azione erosiva da parte degli agenti esogeni (piogge, vento, escursione termica ecc.). I prodotti della loro degradazione, dopo aver subito un'azione di trasporto a opera di vari agenti quali acque o vento, vengono depositi, per effetto della gravità, in vari ambienti, dando origine alle rocce sedimentarie (v. cap. 9).

Tanto le rocce ignee quanto quelle sedimentarie, quando debbano sopportare il carico di altre masse rocciose sospinte dai movimenti tettonici della crosta terrestre, per il conseguente aumento della temperatura e della pressione, si trasformano in rocce metamorfiche. Il metamorfismo delle rocce può verificarsi anche per contatto tra qualsiasi corpo roccioso e flussi o masse magmatiche a elevata temperatura, con possibilità di una fusione parziale delle rocce (**anatessi**; v. a

p. 129) e della formazione di un nuovo magma contenente parti ancora solide della roccia preesistente. Nella realtà, il ciclo descritto può avvenire anche solo parzialmente o con la trasformazione di una roccia in un'altra dello stesso gruppo; per esempio, la fusione di rocce ignee provoca la formazione di magma che, solidificando, dà origine ancora a rocce ignee; l'erosione di rocce sedimentarie porta alla formazione di detriti che, depositatisi, formano un nuovo tipo di roccia sedimentaria; infine, una roccia metamorfica può a sua volta subire il fenomeno del metamorfismo e dare così origine a un'altra roccia metamorfica.



**Figura A**  
Ciclo litogenetico.

## GLOSSARIO

**Atomo**

Il più piccolo costituente fondamentale degli elementi chimici che conserva intatte le caratteristiche chimico-fisiche; è costituito da particelle elementari (protoni, neutroni ed elettroni).

**Composto chimico**

Sostanza formata da due o più atomi di elementi differenti.

**Cristallo**

Corpo solido a struttura geometrica regolare, riflesso della distribuzione spaziale ordinata delle particelle che lo costituiscono (ioni, atomi o molecole).

**Elemento chimico**

Sostanza elementare costituita da atomi tutti dello stesso tipo.

**Isotopi**

Atomi di uno stesso elemento con uguale numero atomico e diverso numero di massa.

**Geminato**

Associazione regolare di due cristalli appartenenti alla stessa specie mineralogica, concresciuti e aventi perciò parti del reticolo cristallino in comune.

**Minerale**

Sostanza solida inorganica di origine naturale, a composizione chimica ben definita e con struttura cristallina.

**Reticolo cristallino**

Struttura spaziale ordinata dei costituenti di un cristallo, che si ottiene per ripetizione nello spazio di una stessa unità strutturale, detta cella elementare.

## TEST DI VERIFICA

1

**I silicati sono:**

- a rocce ignee;
- b minerali;
- c metalli;
- d rocce sedimentarie.

2

**L'olivina è un silicato:**

- a a tetraedro isolato;
- b a catena allungata;
- c a struttura lamellare.

3

**Un tipico minerale sialico è:**

- a l'anfibolo;
- b l'olivina;
- c il quarzo;
- d il pirosseno.

4

**Quale delle seguenti affermazioni è falsa?**

- a i minerali possiedono una determinata formula chimica;
- b le rocce non hanno una composizione chimica ben definita;
- c certe rocce sono monomineraliche;
- d tutti i minerali sono formati da almeno due elementi.

5

**In base alla formula del minerale determinate a quale categoria appartengono:**

- a  $\text{Fe}_2\text{S}$ ;
- b  $\text{CaSO}_4$ ;
- c  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ;
- d  $(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$ ;
- e  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ .

6

**Che cosa si intende per minerale accessorio?**

R

1 b; 2 a; 3 c; 4 d; 5 a: solfuro, b: solfito, c: silicato sialico, d: silicato femico, e: carbonato;  
6 v. a. p. 105.

# 8 Rocce ignee

---

La maggior parte della crosta terrestre è costituita da **rocce ignee**, o **magmatiche** (o anche eruttive), che si formano per raffreddamento e solidificazione del **magma**, il materiale fuso presente all'interno della Terra. In base alla loro **struttura**, che dipende dalla velocità di raffreddamento del magma, esse vengono classificate in rocce ignee **intrusive** ed **effusive**. Possono anche essere classificate in base al contenuto **percentuale di silice**, distinguendole in rocce ignee **acide**, **neutre** e **basiche**. Inoltre, in funzione della loro **composizione mineralogica**, le numerose varietà di rocce ignee possono essere raggruppate in una serie di **famiglie**.

## 8.1 Genesi delle rocce ignee

Le rocce **igne**e (dal latino *ignis*, fuoco), dette anche **magmatiche** o **eruttive**, hanno origine endogena: si formano cioè all'interno della crosta terrestre, o nella parte alta del mantello (lo strato immediatamente sotto la crosta), per raffreddamento e solidificazione del **magma**, miscela fluida ad altissima temperatura, contenente silicati e ricca di gas e vapori. A seconda delle modalità di formazione, il magma presenta composizione e temperature diverse: quello che si forma per fusione della parte superiore del mantello, detto **magma primario**, è ricco di ferro e magnesio ed è molto caldo (la sua temperatura raggiunge 1200-1400 °C); se, invece, la fusione avviene all'interno della crosta terrestre, il magma ha una composizione chimica simile a quella dei materiali circostanti, ricchi di silicio e alluminio (sialici), con temperature di 600-800 °C, e viene chiamato **magma anatettico**. Come si vedrà più avanti, dalla solidificazione di questi due tipi di magma si origina una grande varietà di rocce ignee.

Durante la solidificazione del magma, avviene il processo di **cristallizzazione**, cioè le particelle (atomi o ioni) dei vari elementi in esso contenuti si dispongono in modo ordinato, generando diversi minerali silicati, ognuno con un proprio abito cristallino (v. a p. 98). L'ordine di cristallizzazione dei minerali non è casuale: infatti, prima si formano i minerali a struttura semplice, poi quelli a struttura via via più complessa, secondo la successione indicata dalla **serie di Bowen** (v. riquadro).

Poiché i magmi risalgono in superficie attraverso spaccature presenti nella crosta terrestre, le forme di giacitura delle

Magma primario

Magma anattettico

Cristallizzazione

## SERIE DI BOWEN

Durante la solidificazione di un magma che si sta raffreddando lentamente, il processo di cristallizzazione dei minerali avviene secondo un preciso ordine, indicato dalla **serie di Bowen**, dal nome del petrografo canadese Norman Levi Bowen (1887-1956) che, alla fine degli anni Venti, studiò in laboratorio la cristallizzazione di magmi sintetici. Il processo di cristallizzazione secondo una precisa sequenza all'interno di un magma viene detto **cristallizzazione frazionata**.

Per primi cristallizzano i minerali che possiedono più elevata temperatura di fusione (che coincide con quella di cristallizzazione): tra i silicati femici, l'olivina e i pirosseni; tra quelli sialici, i plagioclasti calcici; successivamente, cristallizzano i silicati a struttura più complessa, come le miche e il quarzo, la cui temperatura di fusione è più bassa.

Anche la forma più o meno regolare dei cristalli e la loro dimensione è indicativa dell'ordine di cristallizzazione: infatti, i minerali che cristallizzano per primi hanno

una forma cristallina più regolare e presentano cristalli più grandi, perché si sono formati in un liquido in cui non c'erano ostacoli per la loro crescita; i minerali che cristallizzano in seguito, costretti a occupare gli spazi residui, assumono di conseguenza forme irregolari e le dimensioni dei loro cristalli sono minori.

La massa di magma non solidifica tutta contemporaneamente; può accadere, però, che, prima che la massa sia completamente solidificata, fenomeni accidentali (per esempio, improvvisi movimenti della crosta terrestre) separino i cristalli solidificati dalla massa ancora allo stato fuso. Si formano così rocce con composizione chimica diversa, anche se il magma originario è lo stesso.

Infine, la serie di Bowen fornisce anche l'ordine di alterabilità dei minerali, che è tanto maggiore quanto le condizioni di mantenimento dei minerali sono diverse da quelle della loro formazione. In pratica, l'alterabilità è maggiore per i minerali cristallizzati a temperature più elevate.

rocce ignee sono molto variabili: spesso sono irregolari e disordinati dalle masse rocciose con cui sono a contatto (rocce incassanti). Le rocce ignee non sono mai limitate in basso, cioè verso l'interno della Terra, da una superficie continua, ma presentano sempre una radice, costituita dal canale di ascesa del magma; questo canale resta più o meno riempito dal materiale eruttivo e rappresenta il collegamento fra la massa eruttiva e il serbatoio magmatico profondo, da cui il materiale delle rocce ha avuto origine.

## 8.2 Struttura delle rocce ignee

La **struttura** di una roccia è determinata dalla forma dei singoli minerali componenti, dalle loro dimensioni e dalla loro reciproca disposizione.

In base alla loro struttura, le rocce ignee possono essere classificate in **intrusive**, o plutoniche, ed **effusive**, o vulcaniche.

### ■ Rocce ignee intrusive

Le rocce ignee intrusive hanno origine quando il magma

Struttura  
olocristallina

**rimane intrappolato nella crosta terrestre.** La sua risalita è lenta e difficoltosa, forma intrusioni nelle rocce della crosta terrestre e, non riuscendo a giungere in superficie, si solidifica in profondità, in tempi lunghi. Imprigionato dalle rocce incassanti, il magma trattiene disciolti i gas e, poiché le masse rocciose sono cattive conduttrici di calore, si raffredda con estrema lentezza. Ciò permette la crescita regolare dei cristalli e la roccia assume una **struttura olocristallina** (dal greco: significa interamente cristallino); tale struttura viene detta anche **granulare**, in quanto è formata da grani di dimensioni generalmente simili e tutti visibili a occhio nudo: **un esempio** di roccia ignea con questa struttura è il **granito**. La formazione di grossi cristalli è favorita dalla presenza di gas e vapori nel magma, che contribuiscono a mantenerlo fluido per un tempo più lungo. I primi cristalli che si formano sono caratterizzati da forme regolari ben definite (cristalli idiomorfi), mentre i minerali che cristallizzano in seguito hanno forme irregolari (cristalli allotriomorfi), poiché, non avendo a disposizione spazio sufficiente per formarsi, adattano la loro forma allo spazio rimanente fra i cristalli già formati.

## Filoni e plutoni

Quando tutta la massa fusa si è solidificata, trasformata in roccia, entra a far parte integrante della crosta terrestre; le rocce ignee intrusive affiorano solo in seguito a processi erosivi o a movimenti della crosta terrestre.

In base alle dimensioni del magma intruso nelle rocce incassanti, le rocce ignee possono formare **corpi intrusivi**, distinti, in base alla loro forma, in filoni, plutoni e laccoliti.

I **filoni** sono corpi intrusivi di forma sottile e dello spessore di qualche metro; si possono presentare iniettati lungo piani paralleli alle rocce incassanti (filoni concordanti, o *sill*) o lungo fratture che le attraversano (filoni discordanti, o *dyke*).

I **plutoni** sono corpi intrusivi con forma a cupola, detta anche "a duomo", pressappoco cilindrica, di dimensioni non piccole, a struttura olocristallina; plutoni di dimensioni enormi (lungi anche più di 100 km) prendono il nome di batoliti.

Le **laccoliti** sono corpi intrusivi di dimensioni inferiori ai plutoni e hanno forma di lente piano-convessa; si formano in seguito a iniezioni superficiali (poche centinaia di metri) di magma viscoso, che, con il procedere dell'intrusione, progressivamente inarca gli strati rocciosi sovrastanti.

■ **Rocce ignee effusive**

Quando il magma, fuoriuscendo sulla superficie terrestre attraverso i condotti vulcanici, si espande in colate laviche e si raffredda rapidamente, si formano le rocce ignee ef-

**fusive**. Il magma, che viene ora detto più precisamente **lava**, per la brusca diminuzione della pressione perde la maggior parte dei gas in esso disciolti e ne consegue la formazione di strutture bollose e scoriacee, specialmente negli strati superficiali della colata lavica. Il raffreddamento della lava è tanto veloce da non permettere la formazione di alcun cristallo: ne risulta così una massa solida non cristallina e la roccia presenta una **struttura detta vetrosa, o amorfa**. Un esempio di roccia ignea effusiva con struttura vetrosa è l'**ossidiana**, roccia di colore nero, usata nella preistoria per confezionare lame e punte di frecce, poiché può formare schegge con bordi taglienti.

La lava

Struttura vetrosa

Il raffreddamento del magma può però avvenire anche in tempi diversi e a diverse profondità: una parte di magma solidifica mentre si trova nella camera magmatica, subisce un raffreddamento lento e graduale e in esso cominciano a formarsi grandi cristalli; la solidificazione della parte rimanente del magma, qualora questo venga emesso all'esterno durante un'eruzione, può continuare poi in superficie: in questo caso, il raffreddamento avviene rapidamente e, a causa del breve tempo di accrescimento, si formano cristalli piccolissimi. Il risultato di questo processo è una struttura intermedia rispetto alle precedenti, detta **struttura porfirica** (tipica del **porfido**, roccia ignea effusiva usata per pavimentazioni stradali), in cui si osservano cristalli più grossi, detti **fenocristalli** (dal greco *fainós*, evidente, visibile), immersi in una pasta di fondo microcristallina o vetrosa.

Struttura porfirica

### 8.3 Composizione chimica delle rocce ignee

I magmi hanno composizioni chimiche assai diverse e possono perciò originare molti tipi di **rocce ignee, che vengono classificate in base al contenuto di silice,  $\text{SiO}_2$** . Si distinguono rocce ignee **acide** (se il contenuto di silice è superiore al 66%), **intermedie** o **neutre** (la silice è compresa tra 66 e 52%), **basiche** (la silice è compresa tra 52 e 45%) e **ultrabasiche** (se la silice è inferiore al 45%).

**Le rocce acide sono anche dette sialiche**, dal simbolo degli elementi più abbondanti in esse, il silicio (Si) e l'alluminio (Al), mentre **le rocce basiche sono dette femiche**, poiché il loro contenuto in ferro (Fe) e magnesio (Mg) è più abbondante che nelle rocce acide.

Il contenuto in silice dei magmi ha inoltre una notevole influenza sulla loro capacità di risalita in superficie. **I magmi acidi** sono molto viscosi, per cui la loro risalita è difficoltosa.

Classificazione in base al contenuto di silice

Magmi acidi



## Magmi basici

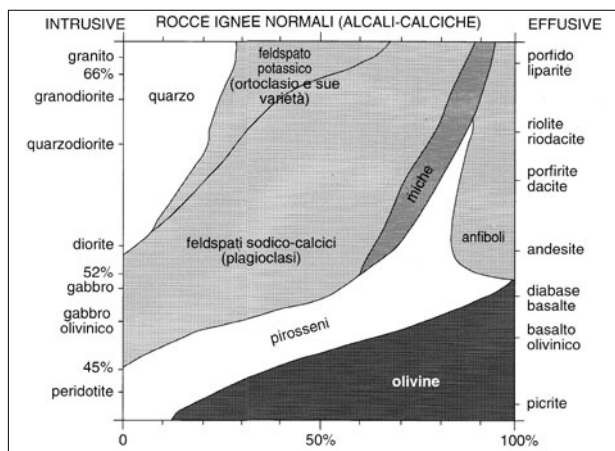
sa. Al contrario, i **magmi basici** sono più fluidi, dunque risalgono in superficie e scorrono con maggiore facilità. Questo è il principale motivo per cui fra le rocce intrusive si trovano prevalentemente rocce acide, come i graniti, che rimangono intrappolati all'interno della crosta terrestre, mentre le rocce effusive sono rappresentate per lo più da rocce basiche come i basalti.

Anche il colore e il peso specifico delle rocce sono fattori distintivi tra le rocce acide e basiche: le rocce acide, infatti, sono chiare e leggere, mentre quelle basiche sono di colore scuro (essendo ricche in minerali di ferro, magnesio e calcio) e hanno pesi specifici elevati, in quanto sono costituite da elementi più pesanti.

## 8.4 Le principali famiglie di rocce ignee

Dalla composizione chimica dei magmi dipende anche la **composizione mineralogica** delle rocce ignee risultanti, cioè la quantità e il tipo di minerali in esse presenti; è tuttavia possibile che, da uno stesso magma, possano formarsi rocce con una composizione mineralogica molto diversa e ciò a causa della cristallizzazione frazionata (v. riquadro a p. 109).

Lo studio della composizione mineralogica di un gran numero di campioni di rocce ignee ha permesso di suddividerle in **famiglie**, ciascuna delle quali comprende rocce ignee sia intrusive, sia effusive; di seguito sono descritte le più importanti (fig. 8.1).



**Figura 8.1**  
Composizione mineralogica delle rocce ignee più comuni.

**La famiglia dei graniti comprende le rocce ignee più acide** (contenuto in silice superiore al 66%). In esse, i minerali essenziali sono il quarzo, il feldspato potassico, i plagioclasti; contengono anche, in percentuali minori, muscovite, biotite e anfiboli. I rappresentanti più comuni di questa famiglia sono i graniti (rocce intrusive) e le rioliti (rocce effusive). I **graniti** sono tipiche rocce plutoniche sialiche, acide, di colore chiaro, costituiti principalmente da quarzo, feldspati e miche. Si originano a profondità elevate (decine di chilometri), dando luogo a enormi masse rocciose dette batoliti. In essi, i cristalli presentano contorni estremamente irregolari e frastagliati e taluni sono più sviluppati di altri. I graniti sono utilizzati come pietre da costruzione e, in lastre lucidate, per pavimentazioni e rivestimenti, essendo materiali resistenti agli agenti atmosferici e all'usura; possono anche essere impiegati, una volta frantumati, come ghiaia e pietrisco. Le **rioliti**, rocce vulcaniche sialiche, comprendono le già citate ossidiane (a struttura vetrosa), le pomici (di aspetto spugnoso) e i porfidi (con struttura porfirica).

Famiglia dei graniti

La **famiglia delle dioriti** comprende rocce costituite quasi unicamente da plagioclasti, anfiboli e pirosseni, di colore grigio. Le più comuni rocce intrusive di questa famiglia sono le **dioriti**, mentre le corrispondenti effusive sono le **andesiti**.

Famiglia delle dioriti

La **famiglia dei gabbri** comprende rocce di colore scuro, formate prevalentemente da plagioclasti calcici e pirosseni, con minor quantità di anfiboli e olivine. Tra esse ricordiamo i **gabbri**, rocce intrusive basiche, e i **basalti**, corrispondenti effusivi, che da soli rappresentano la maggior parte delle rocce effusive presenti sulla Terra. Le lastre lucidate di gabbro servono per pavimentazioni e rivestimenti, mentre le varietà a più alta resistenza e densità, una volta frantumate, sono usate come pietrisco ferroviario.

Famiglia dei gabbri

Le **rocce ultrabasiche** sono composte da olivine e pirosseni; tra esse ricordiamo le **peridotiti**, intrusive, e le **picriti**, effusive; esse hanno distribuzione limitata sui continenti, mentre sono più diffuse sui fondali oceanici.

Rocce ultrabasiche

## GLOSSARIO

**Acido**

In petrografia il termine acido fa riferimento alla percentuale di silice presente nelle rocce ignee: si dice acida una roccia in cui il contenuto di silice supera il 66%.

**Batolite**

Massa rocciosa intrusiva di enormi dimensioni, avente per lo più composizione granitica.

**Cristallizzazione**

Processo di formazione dei cristalli per raffreddamento di un magma, oppure per trasformazione allo stato solido di minerali preesistenti.

**Cristallizzazione frazionata**

Processo di cristallizzazione dei minerali all'interno di un magma, secondo una precisa sequenza, in base alla loro temperatura di fusione: cristallizzano per primi i minerali che possiedono temperatura di fusione più elevata.

**Fenocristalli**

Cristalli ben visibili a occhio nudo, presenti nelle rocce ignee effusive a struttura porfirica, dove sono circondati da una pasta di fondo microcristallina.

**Filone**

Massa intrusiva tabulare, situata entro fenditure della roccia incassante.

**Magma**

Massa fusa silicatica, contenente gas, generata all'interno della Terra e con temperature comprese tra 800 °C e 1300 °C.

**Olocristallina**

Struttura tipica delle rocce ignee intrusive, caratterizzata da cristalli tutti ben visibili a occhio nudo.

**Plutone**

Massa rocciosa di considerevoli dimensioni, originata per intrusione in profondità di un magma successivamente raffreddato e solidificato.

## TEST DI VERIFICA

**1 Un magma è definito acido quando:**

- a** è molto ricco in silice;
- b** è molto ricco in silice e quindi molto fluido;
- c** è molto ricco in silice e quindi molto viscoso;
- d** se sciolto in acqua, dà una reazione neutra.

**2 Le rocce ignee possiedono una struttura olocristallina quando:**

- a** il raffreddamento è stato assai brusco;
- b** non possiede cristalli visibili a occhio nudo;
- c** il raffreddamento è avvenuto gradualmente.

**3 L'ossidiana è una roccia vetrosa perché:**

- a** il raffreddamento è stato assai brusco;
- b** non posseggono cristalli visibili a occhio nudo;
- c** il raffreddamento è avvenuto gradualmente.

**4 Collocate nelle categorie rocce plutoniche (P) e vulcaniche (V) i termini tra quelli elencati:**

- P V** hanno cristalli regolari;
- P V** sono vetrose;
- P V** derivano dal consolidamento di colate laviche;
- P V** hanno tessitura olocristallina;
- P V** si consolidano lentamente;
- P V** sono microcristalline.

R

1 c; 2 c; 3 a; 4 P V, V, P P V

# 9 Rocce sedimentarie

---

Gran parte della superficie terrestre è ricoperta da **rocce sedimentarie**, un **gruppo molto eterogeneo** di rocce che deriva dalla **sedimentazione** di materiali di varia natura. In base all'origine dei componenti, le rocce sedimentarie possono essere classificate in quattro gruppi: **clastiche**, **chimiche**, **organogene** e **piroclastiche**. Esse si formano a partire da rocce preesistenti attraverso il **processo sedimentario**, che comprende varie fasi: la degradazione meteorica delle rocce, il trasporto e il deposito dei sedimenti e la diagenesi, durante la quale avviene la compattazione e la cementazione dei sedimenti.

## 9.1 Classificazione delle rocce sedimentarie

Pur ricoprendo circa il 75% della superficie della Terra, le **rocce sedimentarie** rappresentano solo una piccola parte della crosta terrestre, poiché **formano uno strato molto sottile sopra i continenti e sui fondali oceanici**. Esse si originano per sedimentazione di materiali solidi di varia natura, in diversi ambienti sedimentari (v. par. 9.2) e **vengono classificate in base all'origine dei sedimenti** in rocce clastiche, di deposito chimico, organogene e piroclastiche.

### ■ Rocce clastiche

Le rocce clastiche (dal greco *klázo*, rompo), **dette anche detritiche**, si formano per sedimentazione di **clasti**, cioè frammenti di varie grandezze **che derivano dalla degradazione meteorica di rocce affioranti** sulla superficie terrestre, poi trasportati dalle acque, dai ghiacci, dal vento o dalla forza di gravità, e depositati in luoghi anche molto distanti da quello di origine. In una roccia sedimentaria, **i clasti sono immersi in una sostanza cementante che prende il nome di matrice o cemento** (sulla cui origine si accenna nel par. 9.2).

Dall'analisi dei clasti, si possono ricavare molte informazioni circa l'ambiente di formazione e l'età della roccia stessa; dalla forma e dalle dimensioni dei clasti si può dedurre se questi frammenti hanno subito un notevole trasporto, oppure se si sono depositati a breve distanza dal luogo di origine (le particelle arrotondate indicano un lungo trasporto, a differenza di quelle che presentano spigoli vivi) e si può anche risalire all'agente di trasporto (un ciottolo di forma sferica è rotolato

La formazione dei clasti

lungo il corso di un fiume; se appiattito, probabilmente è stato modellato dall'azione delle onde del mare). In base alla loro granulometria, cioè alle dimensioni dei clasti che le costituiscono, le rocce clastiche sono suddivise in quattro gruppi: i conglomerati, le arenarie, le siltiti e le argilliti (tab. 9.1).

Conglomerati:  
puddinghe e breccie

**I conglomerati si formano in seguito all'accumulo di detriti grossolani**, di dimensioni maggiori di 2 mm, detti anche ghiaie, e **si distinguono in puddinghe**, se i ciottoli sono arrotondati, e **in breccie**, se i frammenti presentano spigoli vivi. È inoltre possibile procedere a un'ulteriore suddivisione dei conglomerati. In base alla natura delle rocce originarie dei clasti, i conglomerati si suddividono inoltre in **monogenici**, se la roccia è costituita da frammenti della stessa natura, oppure **poligenici**, se i clasti costituenti provengono da almeno due tipi di rocce.

Arenarie

**Le arenarie sono rocce sedimentarie originate per sedimentazione** di frammenti con dimensioni comprese fra 2 e 1/16 mm, detti sabbie; questi sedimenti sono estremamente comuni in ambienti sia marini, sia continentali. La composizione mineralogica delle sabbie non dipende solo dalla roccia originaria, ma anche dall'intensità dei fenomeni erosivi subiti.

Siltiti e argilliti

**Siltiti e argilliti sono composte da particelle a grana molto fine**, rispettivamente il **silt** (dimensioni comprese tra 1/16 e 1/256 mm) e l'**argilla** (dimensioni inferiori a 1/256 mm), che sedimentano in mare aperto, sul fondo dei laghi, negli ambienti palustri e lagunari. Essendo facilmente trasportabili, questi sedimenti possono quindi trovarsi anche a notevoli distanze dal luogo di formazione. Le siltiti e le argilliti sono usate nell'industria dei laterizi, delle terrecotte e nell'industria chimica.

### ■ Rocce di deposito chimico

**Le rocce chimiche derivano dalla sedimentazione di sostanze presenti in soluzione nelle acque marine o lacustri**, che poi precipitano a causa del mutare delle condizioni chimico-fisiche della soluzione: ciò accade quando, per evaporazione del solvente, la soluzione diventa satura.

**Tabella 9.1 I clasti e le rocce sedimentarie clastiche**

SEDIMENTO	DIMENSIONI (mm)	ROCCIA CLASTICA
<b>ghiaia</b>	> 2	conglomerato (puddinga o breccia)
<b>sabbia</b>	1/16 ÷ 2	arenaria
<b>silt</b>	1/256 ÷ 1/16	siltite
<b>argilla</b>	< 1/256	argillite

Esse comprendono i calcari, le dolomie, le evaporiti e le selci. **Calcari e dolomie derivano**, rispettivamente, **dalla precipitazione del carbonato di calcio**,  $\text{CaCO}_3$ , **e del carbonato doppio di calcio e magnesio**,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , nelle acque di mari poco profondi e caldi, in seguito a evaporazione molto intensa. I calcari possono formarsi anche in ambiente continentale, come avviene nel caso del **travertino**, roccia chimica formata da carbonato di calcio precipitato per saturazione di acque sorgive. Affiorando, l'acqua delle sorgenti si trova in condizioni di minore pressione e maggiore temperatura: il cambiamento fisico improvviso determina una precipitazione di parte del carbonato di calcio presente in soluzione, che va a incrostare i resti di vegetali che crescono abbondanti in vicinanza delle sorgenti. Con il tempo, la sostanza organica vegetale si decompone e la roccia risulta quindi ricca di pori, che la rendono leggera e molto caratteristica. Il travertino fu una delle rocce più ampiamente usate dagli ingegneri di Roma antica.

Calcari e dolomie

Anche le **evaporiti derivano dalla precipitazione di sali contenuti in acque marine rese sature per l'intensa evaporazione**. L'ordine di precipitazione dei sali dipende dalla loro solubilità: precipitano per primi i sali meno solubili – la calcite,  $\text{CaCO}_3$ , e la dolomite,  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  – e poi via via gli altri, terminando con quelli più solubili (nell'ordine, il gesso,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , l'anidrite,  $\text{CaSO}_4$  e il salgemma,  $\text{NaCl}$ ). **Le selci si formano per precipitazione della silice**,  $\text{SiO}_2$ , che risulta in un deposito di cristalli microscopici di quarzo. Le selci sono rocce durissime, sovente costituite da noduli di quarzo globosi del diametro da qualche centimetro a qualche decimetro, utilizzate in frammenti dall'uomo nell'età della pietra per costruirsi utensili. Un particolare deposito di silice in ambiente continentale, per precipitazione di  $\text{SiO}_2$  da acque calde di origine vulcanica, forma la geysirite.

Evaporiti

Selci

### ■ Rocce organogene

Le rocce sedimentarie organogene possono derivare dalla sedimentazione di resti di organismi viventi che, soprattutto in ambiente marino, estraggono sostanze disciolte nell'acqua (in genere carbonato di calcio o silice) e se ne servono per costruire gusci o scheletri, oppure da biocostruzioni, cioè impalcature rigide costruite da alcuni organismi (**scogliere coralline**). Gli organismi che contribuiscono alla formazione di rocce organogene sono soprattutto molluschi, spugne, coralli, alghe unicellulari ecc., i cui gusci e scheletri, dopo la loro morte, si accumulano sui fondali marini in quantità cospicue, dando origine alle rocce organo-

## LA FORMAZIONE DEL CARBONE FOSSILE

I depositi di carbone attualmente presenti sulla Terra risalgono in gran parte al periodo Carbonifero, che ebbe inizio circa 345 milioni di anni fa e fu caratterizzato da un clima caldo e umido, che favorì la crescita di sterminate foreste in ambienti paludosi. Per centinaia di migliaia di anni, i resti delle piante si andarono accumulando in strati imponenti, che via via furono seppelliti da sedimenti (sabbie e fanghi). I resti vegetali sepolti, al di fuori del contatto con l'ossigeno atmosferico e sottoposti all'azione combinata di alte pressioni, temperature elevate e batteri anaerobi (capaci di vivere in as-

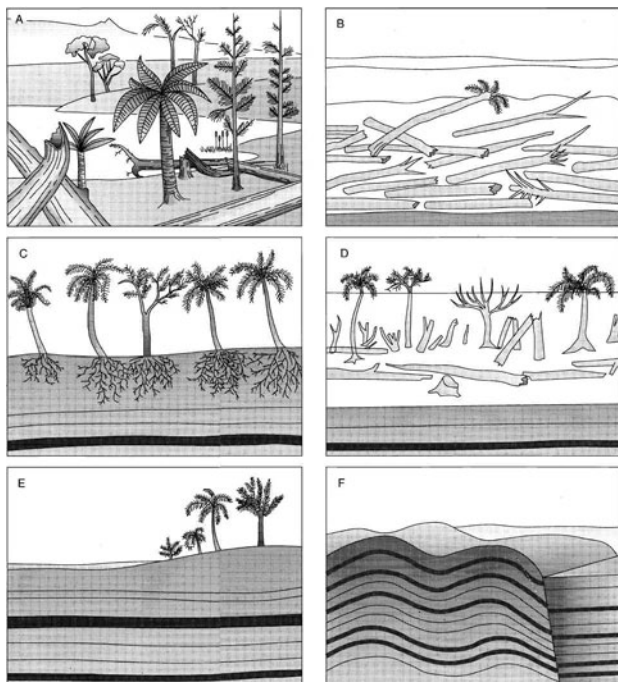
senza di ossigeno), subirono una serie di modificazioni nella loro composizione chimica: progressivamente si ridusse la quantità di idrogeno, ossigeno e azoto presenti nella materia organica vegetale e, di pari passo, aumentò la quantità di carbonio. Come risultato di questo processo, detto **carbonizzazione**, la materia organica originaria fu alla fine trasformata in carbone (fig. 9.1).

In base al contenuto via via crescente in carbonio, che è anche indice della loro età, i carboni vengono distinti in torbe, ligniti, litantraci e antraciti (tab. 9.2).

Carboni fossili	gene, tra cui ricordiamo i calcari, le dolomie e le selci.
Calcari organogeni	Anche i <b>carboni</b> fanno parte delle rocce organogene, poiché formati da resti di origine organica, ma la loro genesi presenta aspetti peculiari rispetto alle precedenti (v. riquadro). I <b>calcari organogeni</b> hanno la stessa composizione di quelli chimici, con la differenza che il carbonato di calcio costituente deriva da resti di organismi.
Dolomie organogene	Le <b>dolomie organogene</b> sono composte da carbonato doppio di calcio e magnesio e si formano attraverso un processo detto dolomitizzazione, a carico di rocce calcaree, in cui parte del calcio viene sostituito dal magnesio presente in soluzione nelle acque (sostituzione metasomatica). Queste rocce hanno dato il nome al gruppo montuoso delle Dolomiti, in cui sono molto diffuse.
Selci organogene	Le <b>selci organogene</b> sono composte da silice, proveniente

**Tabella 9.2** Classificazione dei carboni fossili

TIPO	CARATTERISTICHE
<b>torbe</b>	depositi vegetali d'incipiente carbonizzazione: sono pessimi combustibili, ma discreti correttivi acidi di terreni
<b>ligniti</b>	sono i carboni fossili geologicamente più recenti; hanno già perso, nei processi di trasformazione, una notevole quantità di acqua e anidride carbonica, ma sono ancora ricchi di anidride solforosa e quindi inquinanti
<b>litantraci</b>	sono prodotti di carbonizzazione spinta; buoni combustibili a struttura compatta, nero-opachi o lucenti, trovano i maggiori impieghi pratici. Vengono suddivisi in 4 categorie in base al potere calorifico e al tipo di coke che si produce nella combustione
<b>antraciti</b>	carboni quasi puri, per perdita spinta di zolfo e azoto (oltre che di tutto l'ossigeno) dai tessuti vegetali d'origine; ottimi combustibili, ma poco coerenti (friabili)

**Figura 9.1**

Processo di formazione del carbone: le foreste del Carbonifero proliferano in zone rivasche paludose (A); il susseguirsi di abbassamenti e innalzamenti delle aree costiere (B, C, D) provoca la sommersione da parte del mare e la morte di grandi quantità di vegetazione che, coperte da sedimenti, carbonizzano (gli strati scuri in C, D, E); gli strati carboniferi vengono compressi e modificati dalle spinte verticali e orizzontali dei movimenti tettonici (F).

dai gusci di diatomee (alghe unicellulari) e radiolari (protozoi), oppure dalle spicole silicee di alcune spugne.

### ■ Rocce piroclastiche

Le rocce piroclastiche (dal greco *pirós*, fuoco) presentano una genesi intermedia fra quella delle rocce ignee e quella delle rocce sedimentarie: **sono rocce detritiche, formate dalla sedimentazione di materiali solidi proiettati in aria dai vulcani** (detti **piroclasti**) durante violente esplosioni (l'agente di trasporto dei frammenti, in questo caso, è l'aria). Come le altre rocce sedimentarie, anche le piroclastiche si presentano in vari strati sovrapposti e possono contenere fossili (caratteri che mancano, invece, nelle rocce ignee). I materiali solidi eiettati dai vulcani si distinguono, a seconda delle loro dimensioni via via decrescenti, in **blocchi**, **lapilli**, **sabbie** e **ceneri vulcaniche**. I materiali più grossolani si distribuiscono a minore distanza dal cratere, mentre quelli più fini possono essere trasportati,

Origine vulcanica

Classificazione



Tufo con il favore del vento, anche a centinaia di chilometri. Un esempio di roccia piroclastica è il **tufo**, composto principalmente da ceneri e lapilli.

## 9.2 Il processo sedimentario

Fasi del processo sedimentario

Per quanto eterogenee, tutte le rocce sedimentarie si formano a partire da materiali preesistenti attraverso una serie di trasformazioni che, nel loro insieme, costituiscono il **processo sedimentario**, comprendente: la degradazione meteorica delle rocce; il trasporto e il deposito dei sedimenti in diversi ambienti; la diagenesi, cioè il passaggio da sedimenti incoerenti alla roccia attraverso la compattazione e la cementazione dei singoli frammenti.

### ■ La degradazione meteorica delle rocce

Tutte le rocce sulla superficie terrestre sono soggette a cambiamenti che ne modificano le caratteristiche e ciò avviene quando esse si trovano in condizioni chimico-fisiche radicalmente diverse da quelle in cui si sono originate.

Le rocce affioranti subiscono una **degradazione meteorica**, che consiste in processi di **disgregazione fisica** e di **alterazione chimica a opera dell'atmosfera e dell'idrosfera** e il cui risultato è la formazione di clasti di varie dimensioni. La disgregazione fisica e l'alterazione chimica avvengono contemporaneamente; tuttavia, in ambienti aridi prevale l'azione fisica, in quelli umidi l'azione chimica. Di seguito si accenna ad alcuni dei fenomeni di disgregazione fisica e alterazione chimica che agiscono sulle rocce, descritti in dettaglio nel capitolo 21.

I processi di disgregazione fisica e chimica

Tra i processi di disgregazione fisica ricordiamo: il **crioclastismo**, (dovuto alla solidificazione dell'acqua nelle fratture delle rocce); il **termoclastismo** (dovuto all'escursione termica); l'**idroclastismo** (dovuto alla proprietà di alcune rocce di imbibirsi d'acqua). I processi di alterazione chimica delle rocce includono: l'**ossidazione** (dovuta all'ossigeno atmosferico); l'**idratazione** (che comporta l'assunzione di acqua da parte di alcuni minerali e la loro trasformazione in altri minerali); la **carbonatazione** (dovuta alla presenza di anidride carbonica nelle acque che vengono a contatto con rocce carbonatiche); l'**idrolisi** (una complessa reazione chimica di alterazione dei silicati a opera dell'acqua). Anche gli organismi viventi possono partecipare alla degradazione delle rocce (v. riquadro).

### ■ Il trasporto dei sedimenti e gli ambienti di sedimentazione

I frammenti di diverse dimensioni in cui vengono disgrega-

## L'AZIONE DEGLI ORGANISMI VIVENTI SULLE ROCCE

Anche gli organismi viventi partecipano alla degradazione delle rocce, svolgendo azioni di tipo sia meccanico, sia chimico. Fra le prime va ricordata la capacità di penetrazione delle radici nelle fessure delle rocce, in particolare delle piante di specie pioniere, cioè che per prime si insediano sulle rocce (per esempio, driadi, sassifraghe ecc.). Anche i licheni sono in grado, con i loro rizoidi (piccole strutture simili alle radici per funzione), di ancorarsi a superfici lisce e di penetrarle per la profondità di qualche millimetro (l'azione delle radici, oltre che meccanica, è in parte anche chimica, data la loro capacità di produrre anidride carbonica e, a volte, altri acidi particolarmente corrosivi).

Gli effetti dell'azione chimica possono essere diretti e indiretti. I primi sono propri degli organismi viventi che producono sostanze acide in grado di corrodere vari mi-

nerali delle rocce; è il caso dei litodomi, molluschi marini che secernono acido cloridrico, con il quale scavano nei calcari teci che servono loro da dimora. Azioni simili sono compiute da diversi microrganismi (batteri, alghe ecc.): particolarmente vistosi sono gli alveoli di corrosione biochimica alla base di pareti calcaree a contatto con il suolo umido. Tali nicchie, di dimensione millimetrica, possono unirsi fra loro e dare origine a veri e propri solchi continui e ben visibili.

Gli effetti indiretti sono indotti da prodotti organici derivanti da processi di decomposizione, o, più in generale, catabolici (includenti la respirazione, che comporta l'emissione di anidride carbonica e l'escrezione di rifiuti). L'azione chimica indiretta è alla base della pedogenesi, l'insieme dei processi fisico-chimici che nel tempo portano alla formazione dei suoli a partire da una roccia madre inalterata.

te le rocce per degradazione meteorica possono depositarsi sul posto o, come più spesso accade, essere trasportati altrove da diversi **agenti di trasporto**, quali le piogge, i ghiacciai, i fiumi, i mari, il vento e anche la forza di gravità, che operano, ciascuno, secondo modalità proprie, che saranno oggetto di analisi approfondita nel capitolo 21. Le zone della superficie terrestre in cui si accumulano i sedimenti, dette **ambienti di sedimentazione** (v. riquadro a p. 122), sono numerose e possono essere raggruppate in ambienti continentali, di transizione e marini. Ciascuno di questi ambienti è caratterizzato da particolari tipi di sedimenti o, come meglio si dice, da particolari **facies** (dal latino *facies*, aspetto esteriore), che indicano il complesso dei caratteri litologici e paleontologici (presenza di fossili) di una roccia.

Gli agenti  
di trasporto

### ■ La diagenesi

L'accumularsi di frammenti di diverse dimensioni in vari ambienti porta alla formazione di sedimenti sciolti, incoerenti; la trasformazione di questi in rocce compatte, coerenti, avviene per mezzo della **diagenesi**, fenomeno molto complesso, che si compie in un arco di tempo lunghissimo e che dipende da molti fattori, tra i quali la natura dei sedimenti, l'ambiente di sedimentazione, la pressione degli strati so-

I fattori  
della diagenesi

## GLI AMBIENTI DI SEDIMENTAZIONE

### **Ambienti continentali**

Alcuni fra i più caratteristici ambienti continentali, numerosi e tra loro molto differenziati, sono: quello lacustre, quello alluvionale, quello glaciale e quello desertico. Due sono i meccanismi che possono causare il deposito dei sedimenti sui continenti: l'esistenza di una depressione (bacini lacustri), oppure la cessazione dell'azione di trasporto (per opera di corsi d'acqua, di ghiacciai o del vento).

● **Ambiente lacustre.** Procedendo dai margini verso la parte centrale di un lago, i depositi che si accumulano sono, nell'ordine, argille, sabbie e ghiaie, che possono essere distinte dalle corrispondenti fluviali solo se contengono fossili di animali e vegetali tipici dell'ambiente lacustre. Un altro deposito caratteristico di un lago è la torba, formata da materiali carboniosi, muschi, sfagni e legname; la torba è tipica della fase finale della vita di un lago, che vede il suo progressivo trasformarsi in palude per un fenomeno di graduale interrimento.

● **Ambiente alluvionale (o fluviale).** È caratterizzato da depositi di ghiaie, sabbie e argille, che via via il corso d'acqua deposita diminuendo la sua velocità: le ghiaie sono più abbondanti lungo l'alto corso del fiume, mentre sabbie e argille sono frequenti lungo il medio e basso corso.

● **Ambiente glaciale.** I ghiacciai sono in grado di trasportare notevoli quantità di

materiali solidi, erosi dalle rocce su cui si muovono, per decine e centinaia di chilometri; ma quando essi si sciolgono, il trasporto dei materiali cessa ed essi vengono scaricati formando le morene, sedimenti molto eterogenei per quanto riguarda la dimensione dei singoli frammenti. I frammenti più grandi che un ghiacciaio trasporta e poi abbandona sono chiamati massi erratici. Il ghiacciaio trasporta anche materiali fini, che però vengono facilmente dilavati: i torrenti che escono dalla bocca del ghiaccio trasportano in sospensione questo materiale, che originerà un deposito fluvio-glaciale.

● **Ambiente desertico.** L'agente di trasporto che prevale in questo ambiente è il vento, che solleva le particelle più fini e le trasporta finché, in seguito alla diminuzione della propria velocità, le lascia cadere. Nei depositi eolici (da Eolo, dio del vento nella mitologia greca) si osserva una striatura incrociata dei sedimenti, causata dalle diverse direzioni in cui spirava il vento durante la deposizione delle particelle. Tipici depositi sabbiosi di questo ambiente sono le dune.

### **Ambienti di transizione**

Si tratta di ambienti di passaggio fra gli ambienti continentali e quelli marini, poco estesi ma molto significativi dal punto di vista paleogeografico, poiché permettono di ricostruire le variazioni della linea di co-

vastanti, la temperatura e la profondità degli strati. Durante la diagenesi avvengono la compattazione e la cementazione dei sedimenti.

La compattazione

La **compattazione** consiste in una diminuzione del volume occupato dai sedimenti, dovuta alla pressione esercitata dai sedimenti soprastanti, che intanto continuano ad accumularsi. Il risultato di questa azione è un costipamento dei sedimenti e una riduzione degli spazi tra i singoli clasti, che nel frattempo si liberano dell'aria e dell'acqua prima trattenute.

La cementazione

La **cementazione** consiste nell'introduzione nei pori tra i sedimenti di nuovo materiale minerale, costituito da sali, soprattutto carbonato di calcio, e da silice, che si formano per preci-

sta avvenute in passato e quindi di tracciare il contorno dei mari e delle terre emerse nei diversi periodi geologici. Si distinguono in ambienti lagunari e ambienti deltizi.

● **Ambiente lagunare.** La laguna è un corpo d'acqua in comunicazione con il mare, da cui è parzialmente separato tramite cordoni litoranei. I depositi tipici di questo ambiente sono in genere calcari, che si distinguono da quelli marini perché contengono organismi adatti a sopportare sbalzi di salinità, che spesso si verificano nelle acque di laguna.

● **Ambiente deltizio.** Si trova alla foce dei corsi d'acqua ed è generalmente caratterizzato da depositi di materiali fini, che il fiume non ha depositato lungo il suo corso; in questi depositi si nota spesso la presenza di organismi sia fluviali, sia marini.

#### **Ambienti marini**

Sono gli ambienti più estesi e anche quelli che presentano una maggiore varietà. In funzione della profondità, l'ambiente marino può essere suddiviso in ambiente litorale, ambiente neritico, ambiente batiale e ambiente abissale.

● **Ambiente litorale.** Comprende quella parte di fondale marino entro il quale si verificano le escursioni di marea (differenza tra alta e bassa marea), popolata da organismi che sopportano periodi più o meno prolungati di emersione. In questo

ambiente si forma prevalentemente la panchina, un tipo di calcare bioclastico: i granuli che la compongono possono derivare da processi di disaggregazione fisica di altre rocce carbonatiche, oppure essere di origine biologica, costituiti da frammenti di gusci, teche di molluschi e pezzi di ossa.

● **Ambiente neritico.** È compreso tra la linea di bassa marea e i 200 m di profondità: il tratto di fondale marino corrispondente prende il nome di piattaforma continentale. In questa zona, i sedimenti possono essere di origine organogena o clastica; nel secondo caso, essi sono selezionati dall'azione delle correnti marine e delle onde, in base alla loro dimensione: i più grossolani si trovano vicino alla costa e i più fini si accumulano a maggiore distanza.

● **Ambiente batiale.** Si estende dai 200 m di profondità fino ai 4000 m, in corrispondenza della scarpata continentale; lungo questa, che presenta una notevole pendenza, possono franare i sedimenti incoerenti che si trovano al limite della piattaforma continentale e depositarsi fanghi contenenti anche gusci di organismi planctonici.

● **Ambiente abissale.** Si estende oltre i 4000 m di profondità, in corrispondenza della piana abissale, in cui si accumulano melme ricche di resti organici o depositi inorganici molto fini.

pitazione dalle acque circolanti nei sedimenti e che, legando i sedimenti incoerenti, li trasformano in roccia coerente.

### **9.3 La stratificazione delle rocce sedimentarie**

Osservando una formazione di rocce sedimentarie, vi si nota spesso una caratteristica successione di strati.

Per **strato** si intende una **struttura rocciosa uniformemente piatta e molto estesa, con spessore variabile** a seconda della quantità di materiale disponibile nei vari momenti della sedimentazione, **delimitata da una superficie superiore**

Che cos'è uno strato

**detta tetto e, in basso, da una inferiore detta letto.**

Ogni strato, cioè ogni singola unità di deposizione della roccia, registra al suo interno le variazioni avvenute durante il processo di sedimentazione: è possibile, per esempio, che si osservino cambiamenti nella composizione dei sedimenti.

La stratificazione fornisce, inoltre, delle superfici di riferimento, che permettono di costruire l'ordine di sovrapposizione dei sedimenti. Sulla superficie di stratificazione possono trovarsi strutture connesse con l'attività della corrente che ha depositato il materiale, o con l'ambiente di deposizione, o con la presenza diretta di organismi o di loro impronte e tracce. Tipica delle rocce sedimentarie è infatti la presenza di **fossili**, resti di organismi o di loro tracce, rimasti intrappolati nei sedimenti.

I fossili

I movimenti  
della stratificazione

La posizione originale degli strati è quella orizzontale, che si determina durante la sedimentazione; essi si sovrappongono formando una successione stratigrafica. Spesso, però, gli strati possono venire rimossi dalla loro originaria posizione a opera di potenti forze agenti sulla crosta terrestre (movimenti tettonici), che si comportano in vario modo, dislocandoli, piegandoli o fratturandoli. **Due strati si dicono concordanti se sono tra loro paralleli; discordanti se non lo sono.** Per effetto di spinte laterali, gli strati possono corrugarsi e formare pieghe (v. a p. 162), senza perdere però il loro parallelismo.

## GLOSSARIO

### **Arenaria**

Roccia sedimentaria formata da granuli di sabbia tenuti assieme da cemento calcareo, argilloso o siliceo.

### **Argilla**

Roccia sedimentaria costituita in prevalenza da silicato idrato di alluminio misto ad altri minerali. Bagnata, diventa molto malleabile ed è in grado di mantenere la forma dopo la cottura e l'essiccamento.

### **Breccia**

Roccia sedimentaria clastica formata da frammenti con spigoli vivi di diametro superiore a 2 mm.

### **Calcare**

Roccia sedimentaria di origine chimica od organogena, composta da carbonato di

calcio sotto forma di calcite in misura superiore al 50%.

### **Carbone**

Sostanza combustibile solida, composta in prevalenza da carbonio (in forma di grafite), che brucia con reazione fortemente esotermica. Deriva dalla lenta e più o meno prolungata trasformazione di residui vegetali, rimasti coperti da strati di materiale sedimentario.

### **Clasti**

Ciascuno dei frammenti di materiale roccioso proveniente dalla disaggregazione delle rocce dovuta ad agenti meteorici.

### **Diagenesi**

Insieme di processi chimico-fisici che si verificano all'interno di un sedimento tra

## segue

i minerali che lo costituiscono, o tra questi e le soluzioni che circolano nel sedimento, dal momento della sua deposizione fino alla formazione della roccia solida.

**Facies**

Complesso dei caratteri litologici e paleontologici presenti in una roccia, tali da consentire il riconoscimento del suo ambiente di origine.

**Sedimentazione**

Processo di deposizione e accumulo di materiale di varia natura e origine sulla superficie terrestre, in ambiente subaereo o

subacqueo. Può essere essenzialmente di tre tipi: meccanica, chimica e organogena.

**Stratificazione**

Caratteristica posseduta dalla maggior parte delle rocce sedimentarie, consistente nella sovrapposizione di una serie di superfici, piane e parallele, che suddividono la massa rocciosa in porzioni dette strati.

**Tufo**

Roccia piroclastica formatasi per sedimentazione di materiale proveniente da eruzioni vulcaniche esplosive, in ambiente subaereo o subacqueo.

## TEST DI VERIFICA

**1 In ambienti aridi l'alterazione chimica:**

- a è praticamente assente;
- b è il maggior fenomeno di degradazione;
- c prevale sull'erosione effettuata dal vento;
- d tutte le alternative.

**2 La disgregazione fisica accelera l'alterazione chimica perché:**

- a aumenta la superficie a contatto tra rocce e atmosfera;
- b espone all'atmosfera minerali che normalmente sarebbero nascosti;
- c permette a certi minerali di essere trasportati dalle acque;
- d nessuna delle precedenti.

**3 I conglomerati sono tipiche:**

- a rocce carbonatiche;
- b rocce clastiche;
- c rocce di deposito chimico;
- d rocce organogene.

**4 Le rocce clastiche si suddividono in base:**

- a alla granulometria;
- b al colore;
- c alla tessitura;
- d al chimismo.

**5 Le dolomie sono rocce:**

- a clastiche;
- b di deposito chimico;
- c organogene;
- d nessuna delle precedenti.

**6 La compattazione è il risultato di una riduzione:**

- a di volume del sedimento;
- b di peso del sedimento;
- c della superficie del sedimento.

**R**

1 a; 2 a; 3 b; 4 a; 5 b; c; 6 a.

# 10 Rocce metamorfiche

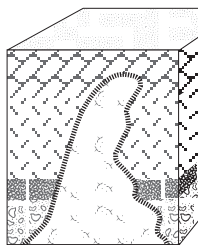
Tutte le rocce della crosta terrestre possono subire una profonda trasformazione, detta **metamorfismo**, a opera di agenti fisici, quali la **temperatura** e la **pressione**, e originare così le **rocce metamorfiche**. In base all'agente fisico che prevale durante la trasformazione delle rocce, si possono distinguere tre diversi tipi di metamorfismo: **di contatto**, **dinamico** e **regionale**. Un incremento della pressione e della temperatura oltre certi valori determina poi il fenomeno dell'**anatessi**, forma di transizione fra condizioni metamorfiche e magmatiche. Le rocce metamorfiche possono presentare una **struttura scistosa**, **granulare** od **occhiadina**.

## 10.1 Il metamorfismo

Il termine **metamorfismo** deriva dal greco e significa letteralmente “cambiamento di forma”; più propriamente, **può essere definito come un cambiamento della struttura** (fig. 10.1.) e/o della **composizione mineralogica di una roccia preesistente** (che può essere, per esempio, ignea o sedimentaria) **senza passare attraverso la fusione**. Durante il metamorfismo si verificano, cioè, fenomeni di ricristallizzazione (formazione di cristalli diversi da quelli presenti nella roccia originaria) e di reazioni chimiche fra minerali costituenti la roccia, che rimangono comunque allo stato solido: tutto ciò è **possibile solo se si determina un notevole aumento di temperatura e/o di pressione**.

Salvo poche eccezioni, nel processo metamorfico la **composizione chimica della roccia non cambia**, ma, in seguito ai processi di ricristallizzazione, **si modifica la sua composizione mineralogica**.

Analizzando la composizione mineralogica di una roccia metamorfica, non è sempre facile individuare la roccia da cui essa proviene: può accadere, infatti, che rocce differenti per origine e composizione mineralogica, ma con la stessa composizione chimica, poste nelle stesse condizioni di temperatura e di pressione, possano dare origine alla medesima roccia metamorfica (fenomeno detto di “convergenza”). Può anche succedere che, da rocce originarie uguali, si formino rocce metamorfiche diverse e ciò dipende dell'intensità del processo di trasformazione subito: a questo proposito si parla di **grado di metamorfismo**, che può essere alto, medio o basso.



**Figura 10.1**  
Formazione di un'aureola metamorfica per metamorfismo di contatto.

	aureola metamorfica di contatto
	granito
	calcare (Cenozoico)
	arenaria (Mesozoico)
	argilla (Mesozoico)
	calcare marmoso (Paleozoico)

In definitiva, la composizione mineralogica finale assunta da una roccia metamorfica dipende sia dall'intensità del processo metamorfico, sia dalla composizione chimica di partenza (v. riquadro).

## GLI EFFETTI DEL METAMORFISMO SULLE ROCCE

Una roccia sottoposta a diversi gradi di metamorfismo può originare diverse rocce metamorfiche, che nel loro insieme costituiscono una **sequenza metamorfica**.

### *La sequenza metamorfica delle argille*

Le **argille** sono formate da quarzo e da silicati lamellari, che hanno la proprietà di imbibirsi d'acqua. Appena deposte in un bacino sedimentario, formano un fango mobile, straordinariamente ricco d'acqua; quando sono ricoperte da altri sedimenti, si compattano, espellendo l'acqua. Un ulteriore aumento di pressione provoca l'allineamento dei silicati lamellari che le costituiscono, in strati o letti: si forma un **argiloscisto**.

Gli argiloscisti possono essere considerati rocce sia sedimentarie, sia metamorfiche, di bassissimo grado di metamorfismo, formatesi in seguito all'aumento estremamente modesto della temperatura e della pressione.

In condizioni di basso grado di metamorfismo, le lamelle argillose si riuniscono in minuti cristalli di mica, indistinguibili a occhio nudo se non per la loro lucentezza d'insieme. La roccia metamorfica che si forma è una **fillade**, in grado di suddividersi facilmente in sottili fogli, lungo i piani lamellari micacei.

Un aumento di grado metamorfico provoca l'accrescimento dei cristalli quarzosi e delle lamelle micacee: la roccia che si forma è un **micascisto**, che presenta piani di scistosità ben distinguibili a occhio nudo.

Quando il grado di metamorfismo è medio-alto, dalla mica e dal quarzo si formano i minerali del gruppo dei **feldspati**. I grossi cristalli originati tendono ad asso-

ciarsi ai cristalli quarzosi in letti biancastri dello spessore di qualche centimetro. La roccia che si origina, lo **gneiss**, si frattura lungo i piani costituiti dalle lamelle micacee con una scistosità marcata, ma più grossolana di quella dei micascisti.

A un ulteriore aumento di temperatura e pressione corrisponde una fusione progressiva dei soli letti quarzoso-feldspatici. Il materiale è in grado di iniettarsi negli interstizi delle porzioni rocciose solide e si origina così una **migmatite**, spesso non scistosa, formata da una mescolanza di frazioni derivanti dalla cristallizzazione di materiale fuso e di frazioni che conservano la tessitura dello gneiss.

### *La sequenza metamorfica dei calcari*

Quando i sedimenti calcarei sono sepelliti, vengono in contatto con le acque circolanti del sottosuolo, che li sciolgono parzialmente, arricchendosi in carbonato di calcio, o li compattano e li cementano, facendo precipitare carbonato di calcio cristallino (**calcite**), che riempie gli interstizi e le eventuali cavità presenti.

Il processo metamorfico, già a basse temperature e pressioni, provoca una ricristallizzazione progressiva della calcite, con la totale distruzione della struttura sedimentaria. Si forma così il **marmo**, composto da un mosaico di granuli cristallini di calcite.

La calcite è stabile anche ai più alti gradi metamorfici e non subisce trasformazioni chimiche; gli altri minerali, eventualmente presenti nel calcare come impurità, subiscono invece trasformazioni che permettono di riconoscere il grado metamorfico raggiunto e, se abbondanti, possono conferire alla roccia particolari venature.



## 10.2 Tipi di metamorfismo

In base all'agente fisico, temperatura o pressione, che maggiormente prevale nella trasformazione delle rocce preesistenti, si individuano comunemente tre tipi di metamorfismo: di contatto, dinamico e regionale.

Metamorfismo  
di contatto

**Il metamorfismo di contatto si verifica nelle rocce che si trovano a diretto contatto con un magma incandescente**, che si sta raffreddando in profondità o che sta risalendo verso la superficie terrestre; la principale causa di trasformazione è dunque l'elevata temperatura (di norma compresa tra 200 e 800 °C), per cui le rocce subiscono fenomeni di ricristallizzazione, ma anche trasformazioni chimiche, dovute al passaggio nella roccia dei gas presenti nel magma. Nella massa rocciosa a diretto contatto con il magma, **si crea così una zona che ha subito modificazioni, cioè metamorfosata, che prende il nome di aureola metamorfica di contatto**, una sorta di "guscio" di rocce metamorfiche che avvolgono la massa magmatica: in questa zona le modificazioni sono più accentuate, mentre vanno diminuendo via via che ci si allontana da essa, fino a scomparire completamente.

**Un esempio di roccia originatasi per metamorfismo di contatto è il marmo**, che si forma per ricristallizzazione di rocce calcaree.

Metamorfismo  
dinamico

**Il metamorfismo dinamico, detto anche cataclastico, si verifica in corrispondenza di grandi fratture della crosta terrestre**, dette faglie, che interessano notevoli spessori; le rocce che costituiscono i due bordi della faglia (e sono fra loro a contatto) si spostano le une rispetto alle altre sotto l'azione di forze ingentissime, che le **sottopongono a elevate pressioni** che determinano in esse cambiamenti di struttura e talvolta anche di composizione mineralogica. Lungo i piani di faglia (v. a p. 159), le rocce vengono frantumate e si forma una roccia simile a una ghiaia grossolana, detta breccia di frizione. In certe zone limitate, in prossimità del piano di faglia, il calore prodotto per attrito crea le condizioni propizie per un comportamento plastico delle rocce. In tal caso, per la fortissima pressione orientata, si formano rocce molto scistose (v. par. 10.4), le **miloniti**.

Metamorfismo  
regionale

**Il metamorfismo regionale**, a differenza del metamorfismo di contatto e di quello dinamico (che sono circoscritti, rispettivamente, all'area di contatto con il magma e alla faglia), **interessa zone molto vaste di territorio**, coinvolte in una serie di fenomeni geodinamici (v. cap. 12) e, in particolare, è **associato allo scontro di placche terrestri** (porzioni in cui risulta divisa la crosta terrestre) e **all'orogenesi**, cioè ai pro-

cessi di formazione delle catene montuose. Questo tipo di metamorfismo avviene per azione combinata della temperatura e della pressione e interessa tutte le rocce che vengono a trovarsi a notevoli profondità, in seguito ai movimenti della crosta terrestre: il conseguente aumento di temperatura e pressione a cui sono sottoposte le rocce causa una ricristallizzazione dei minerali componenti (con formazioni di cristalli tanto più grandi quanto più elevato è il grado di metamorfismo). Per azione della pressione, durante il processo di ricristallizzazione i cristalli tendono a svilupparsi principalmente nella direzione perpendicolare a quella in cui agisce la pressione e il risultato di questa azione è la caratteristica **struttura scistosa** delle rocce metamorfiche (v. par. 10.4).

### 10.3 L'anatessi

Quando la temperatura diventa così elevata (in genere fra 700 e 800 °C) che i minerali non possono più esistere allo stato solido, la roccia fonde: questo processo, che può essere considerato un fenomeno di transizione tra condizioni metamorfiche e ignee (o magmatiche), è detto **anatessi**.

Che cos'è l'anatessi

Il fenomeno fu scoperto in seguito all'osservazione di particolari rocce associate a rocce metamorfiche originatesi per metamorfismo di grado alto, le **migmatiti**. Pur in un'estrema varietà di aspetti, esse presentano la caratteristica comune di essere composte da due distinte porzioni: una di aspetto igneo, generalmente di composizione granitica, l'altra di aspetto metamorfico. Ciò può essere spiegato ammettendo che la porzione di aspetto igneo sia la testimonianza di una fusione parziale della roccia preesistente, in cui solo i minerali che fondono a temperature inferiori hanno originato vene di magma, mentre il resto della roccia è rimasto allo stato solido.

Le migmatiti

Il processo di anatessi è di grande importanza per lo studio della formazione dei magmi: infatti, esso può originare magmi granitici anche a temperature molto inferiori a quelle necessarie per la fusione totale della roccia.

### 10.4 La struttura delle rocce metamorfiche

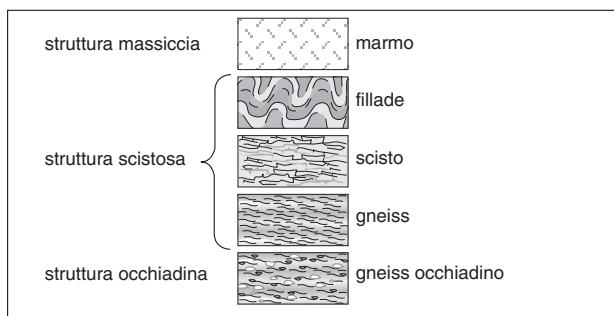
La struttura delle rocce metamorfiche è diretta conseguenza del tipo di metamorfismo che le ha originate: a seconda che abbia prevalso l'azione della pressione, della temperatura o entrambe, si possono avere diversi tipi di struttura, scistosa, granulare od occhiadina.

La maggior parte delle rocce metamorfiche ha **struttura sci-**

Struttura scistosa

**Figura 10.2**

Principali tipi di struttura delle rocce metamorfiche.



**stosa**, cioè presenta cristalli disposti su piani paralleli, allungati e orientati in una sola direzione, perpendicolare a quella lungo la quale ha agito la pressione. Grazie alla loro scistosità, alcune rocce metamorfiche possono essere facilmente divise in strati sottili, lungo piani paralleli, detti piani di scistosità. Esempi di rocce a tipica struttura scistosa sono le filladi e i micascisti, utilizzati per la copertura dei tetti, e gli gneiss, usati come materiale per rivestimenti.

Struttura granulare

Esistono anche rocce metamorfiche con **struttura granulare**, detta anche saccaroide, in cui i cristalli sono equidimensionali e non sono orientati; esempi di rocce a struttura granulare sono il marmo, che si origina per metamorfismo di contatto dai calcari, e la quarzite, derivata da arenarie quarzose.

Struttura occhiadina

Infine, vi sono rocce metamorfiche che presentano una **struttura occhiadina**, con caratteristiche intermedie fra le due precedenti: si osservano, infatti, cristalli equidimensionali e di dimensioni maggiori frammisti a cristalli orientati e disposti in strati paralleli; una roccia con questa struttura è lo gneiss occhiadino (v. fig. 10.2).

**Tabella 10.1 Le più comuni rocce metamorfiche**

TIPO DI ROCCIA	CARATTERISTICHE
<b>fillade</b>	roccia a grana molto fine, composta principalmente da microscopiche lamelle di mica (è il prodotto di un basso grado di metamorfismo su un'argillite)
<b>micascisto</b>	roccia composta in massima parte da lamelle visibili di minerali appiattiti; come la fillade, si forma spesso dalle argilliti, ma in questo caso il metamorfismo è stato più intenso; spesso sono presenti nuovi minerali, esclusivi delle rocce metamorfiche
<b>gneiss</b>	roccia a composizione molto simile al granito; la caratteristica più rilevante è l'aspetto striato, dovuto ai caratteristici strati alternati di minerali chiari e scuri
<b>marmo</b>	roccia risultante dal metamorfismo di un calcare; è costituita da cristalli di calcite, in granuli di dimensioni fino a 5 mm, che le conferiscono il particolare aspetto saccaroide (simile a quello dello zucchero)
<b>quarzite</b>	comune roccia metamorfica derivata da un'arenaria quarzosa, all'apparenza simile al marmo, ma molto più dura

## GLOSSARIO

**Anatessi**

Fusione parziale di una massa rocciosa preesistente.

**Gneiss**

Roccia metamorfica a struttura scistosa, formatasi in seguito a metamorfismo regionale da rocce ignee o sedimentarie.

**Marmo**

Roccia a struttura granulare, originatasi per metamorfismo di contatto del calcare.

**Metamorfismo**

Trasformazione di una roccia preesistente, che si manifesta mediante reazioni allo stato solido tra i suoi minerali, con cambiamento della composizione mine-

ralogica e/o della struttura.

**Milonite**

Roccia metamorfica derivata dalla minutissima frantumazione, seguita da ricristallizzazione, dei singoli costituenti di una roccia preesistente.

**Scistosità**

Proprietà delle rocce metamorfiche di separarsi in lastre sottili secondo piani paralleli, detti piani di scistosità.

**Tessitura**

Aspetto particolare, osservabile anche a occhio nudo, presentato da una roccia in conseguenza della disposizione spaziale dei suoi costituenti mineralogici.

## TEST DI VERIFICA

**1 Il marmo deriva da una roccia:**

- a** sedimentaria chimica;
- b** magmatica intrusiva;
- c** magmatica effusiva;
- d** metamorfica.

**2 Per metamorfismo di contatto si intende:**

- a** quello dovuto al contatto di rocce preesistenti con corpi magmatici;
- b** l'effetto del contatto reciproco tra due rocce differenti per lunghi intervalli di tempo;
- c** quello ottenuto per effetto dell'alta pressione e temperatura sulle rocce preesistenti;
- d** l'effetto del seppellimento di rocce.

**3 Una caratteristica tipica delle rocce metamorfiche è:**

- a** la stratificazione;
- b** la scistosità;
- c** la granulometria omogenea;
- d** la porosità.

**4 L'anatessi è:**

- a** la conseguenza di un metamorfismo molto spinto;
- b** lo strumento che misura il metamorfismo;
- c** il rapporto tra peso e massa;
- d** una teoria sul metamorfismo.

**R**

1 a; 2 a; 3 b; 4 a.

# 11 L'interno della Terra

---

Negli ultimi decenni si sono intensificate le ricerche sull'interno della Terra, per meglio comprendere fenomeni quali il vulcanismo, i terremoti e molti altri, che vi si originano.

Grazie ai risultati di numerose **indagini, dirette e indirette**, e soprattutto allo **studio delle onde sismiche**, gli scienziati hanno proposto per il nostro pianeta un **modello a involucri concentrici**, detti rispettivamente, procedendo dall'esterno verso l'interno, **crosta, mantello e nucleo**, tra loro **separati da superfici di discontinuità**. A questa suddivisione di tipo geochimico se ne è poi sovrapposta un'altra di tipo geofisico, basata sulla maggiore o minore rigidità degli involucri e che distingue, all'interno della crosta e del mantello, la **litosfera**, l'**astenosfera** e la **mesosfera**.

**Il modello proposto rende conto anche dei risultati ottenuti studiando le variazioni del campo gravitazionale terrestre, del calore interno della Terra e del campo magnetico terrestre, che in passato ha subito numerose inversioni di polarità, come testimonia il paleomagnetismo.**

## 11.1 Lo studio dell'interno della Terra

La conoscenza dell'interno della Terra è indispensabile per comprendere gran parte dei fenomeni che avvengono sul nostro pianeta, in particolare i fenomeni vulcanici e sismici, ma anche la formazione delle catene montuose e molti altri che saranno oggetto dei prossimi capitoli.

Metodi di indagine  
diretta

Per descrivere l'interno della Terra, è necessario disporre di informazioni circa la composizione chimica e la struttura fisica del nostro pianeta (il cui raggio è pari a 6370 km); tuttavia, l'osservazione diretta dell'interno della Terra si limita solo alla parte più superficiale della pianeta: i **metodi di indagine diretta** possono essere attuati, per esempio, in occasione dello scavo di miniere, delle trivellazioni di pozzi per le ricerche petrolifere (che possono spingersi fino a poco più di 10 km di profondità) o in presenza di magma emesso dai vulcani, proveniente da non più di qualche centinaio di chilometri di profondità.

Metodi di indagine  
indiretta

Informazioni sulla struttura delle parti più profonde della Terra si sono invece potute ricavare grazie a **metodi di indagine indiretta**, che comprendono l'analisi dei sismogrammi, cioè i tracciati delle onde sismiche (che si generano durante i terremoti) e lo studio di alcune caratteristiche fisiche della Terra, quali il campo gravitazionale terrestre, il flusso di calore

proveniente dall'interno della Terra e il campo magnetico terrestre. Anche per quanto riguarda la composizione chimica delle parti più profonde della Terra, si è ricorsi a un metodo di indagine indiretta, si è, cioè, ipotizzato che la composizione chimica del pianeta sia una diretta conseguenza della sua origine. Più precisamente, si sono ricavate informazioni dallo studio delle meteoriti cadute sulla Terra, formate da una lega di ferro e nichel e considerate come residui del materiale che costituiva il sistema solare in formazione (v. riquadro in basso).

### ■ Lo studio delle onde sismiche

Lo studio delle onde sismiche rappresenta il metodo fondamentale per indagare l'interno della Terra.

Durante un terremoto, nell'ipocentro (punto interno alla Terra, da cui ha origine il terremoto) si generano **due tipi di**

#### L'ORIGINE DELLA TERRA

Si pensa che la Terra, come gli altri pianeti del sistema solare, abbia avuto origine a partire da un sottile disco formato da minuscole particelle solide, immerse in una sorta di "ciambella" gassosa che circondava il Sole nel momento in cui quest'ultimo andava formandosi (all'incirca 4,6 miliardi di anni fa) da una nube interstellare di polvere e gas (probabili resti di una supernova). Nelle zone più vicine al Sole, più o meno dove si sarebbe formata la Terra, vi erano corpuscoli formati da elementi metallici e da composti chimici, tra cui silicati e acqua (sotto forma di ghiaccio). La progressiva aggregazione di tali corpuscoli portò alla formazione di numerosi corpi maggiori, con raggio medio probabilmente di qualche chilometro: i pianetesimi. Questi ultimi, con il tempo, andarono incorporando altri corpi più piccoli, che incontravano lungo il tragitto, continuando ad accrescersi. A un certo punto, i pianetesimi cominciarono a incontrarsi fra loro, a volte frantumandosi, a volte aggregandosi per formare corpi di dimensioni ancora maggiori. Alla fine, comunque, tutti i frammenti si concentrarono in alcuni corpi più grandi: i **pianeti**, fra cui la Terra. Durante la sua formazione (intorno a 4,5 miliardi di anni fa), la Terra si scaldò mo-

deratamente, in parte in seguito alla trasformazione in calore dell'energia gravitazionale dei frammenti che via via si aggregavano, in parte in seguito all'energia emessa da elementi radioattivi presenti nel materiale originario.

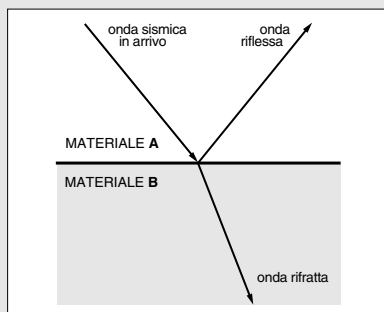
Il conseguente aumento di temperatura provocò la fusione del materiale planetario: la parte più densa, formata in prevalenza da metalli come ferro e nichel, si raccolse al centro; i materiali con densità intermedia, come il basalto, si disposero in uno strato sovrastante; infine, i materiali meno densi, come i silicati, si distribuirono sulla superficie.

La massa allo stato fuso della Terra (con una temperatura superficiale di circa 800 °C) era avvolta da un'atmosfera pesante e venefica, formata dai gas provenienti dalla superficie. La temperatura diminuì rapidamente e cominciarono a formarsi i primi tratti di crosta solida, sempre più spessa, fino alla nascita dei continenti; contemporaneamente, l'atmosfera primitiva fu sostituita da una nuova coltre gassosa, ricca di metano, ammoniaca e vapor d'acqua: quest'ultimo, condensando, produsse piogge abbondanti, che si raccolsero nelle concavità della crosta terrestre dando origine agli oceani.

## LE DISCONTINUITÀ SISMICHE

Lo studio delle onde sismiche è un metodo d'indagine indiretta che ha permesso di ricavare importanti informazioni sulla struttura interna del nostro pianeta.

L'esplorazione indiretta del sottosuolo è basata sulla misurazione dei tempi impiegati da parte di onde elastiche, prodotte artificialmente tramite esplosioni, vibrazioni o da masse battenti, a percorrere distanze note. Appositi sismografi, detti geofoni, posti a distanze prestabilite gli uni dagli altri e a una distanza nota dal punto in cui si è sviluppata l'onda elastica, ne registrano su nastri magnetici l'arrivo. Quando le onde sismiche, che sono onde elastiche, attraversano mezzi diversi oppure due zone dello stesso mezzo, ma a diversa densità, esse vengono scisse in due componenti: un'onda riflessa, che torna indietro, e un'onda rifratta, che prosegue oltre la superficie di discontinuità, ma con traiettoria deviata rispetto all'originaria (fig. A). Viaggiando verso l'interno della Terra, le onde sismiche cambiano di velocità: questa aumenta quando la densità del mezzo aumenta e viceversa. I cambiamenti di velocità e direzione più signifi-



**Figura A**

*Comportamento delle onde sismiche.*

ficativi delle onde sismiche avvengono a profondità ben definite, che corrispondono a superfici dette **discontinuità sismiche**: esse indicano cambiamenti netti di proprietà fisiche e chimiche del nostro pianeta e hanno permesso di suddividere l'interno della Terra in tre involucri concentrici: crosta, mantello e nucleo.

La **discontinuità di Mohorovičić**, o **Moho**, separa la crosta terrestre dal cosiddetto

Onde P e onde S

**onde sismiche**, dette **onde P** (longitudinali) e **onde S** (trasversali), che si propagano in tutte le direzioni all'interno della Terra e possono essere registrate da strumenti detti sismografi (v. a p. 182). Le onde sismiche interagiscono con i materiali che attraversano durante la loro propagazione e forniscono così informazioni sulla natura delle zone attraversate. Lo studio della propagazione delle onde sismiche avviene attraverso l'analisi dei sismogrammi, grafici che registrano le onde sismiche e la cui lettura indica le interazioni fra queste e i materiali attraversati.

La propagazione delle onde sismiche

Se, durante la loro **propagazione all'interno della Terra**, le **onde sismiche attraversano strati di natura diversa**, possono essere rifratte, cioè deviate dalla loro precedente direzione di propagazione, riflesse o subire una variazione di velocità. Queste modificazioni dipendono dalle caratteristiche dei materiali attraversati, quali la densità, la temperatura, lo stato fisico e la composizione chimica: in particolare, la velocità di propagazione delle onde sismiche è diretta-

mantello litosferico: in sua corrispondenza la velocità delle onde sismiche cambia bruscamente, indicando un aumento della densità; essa si trova a una profondità media di 35-40 km sotto i continenti e di 8-10 km sotto gli oceani.

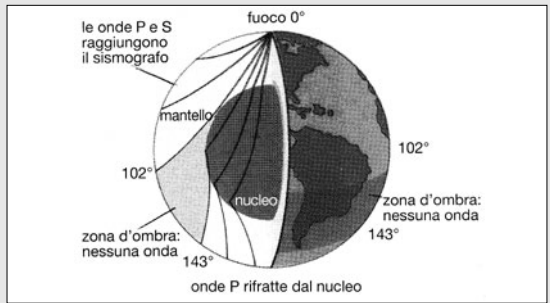
A circa 2900 km di profondità si trova la **discontinuità di Gutenberg**, che divide il mantello dal nucleo.

All'interno del nucleo, alla profondità di circa 5000 km, si trova infine la **discontinuità di Lehmann**, che separa il nucleo esterno "fuso" dal nucleo interno "solido". La pre-

senza di questa discontinuità è dimostrata dall'esistenza di una **zona d'ombra**, cioè un'ampia fascia che si estende sulla superficie del globo, comprendendo tutti i luoghi che distano da 103° a 142° dall'ipocentro, nella quale arriva solo una piccola parte dell'energia delle onde P e dove non si registrano le onde S (fig. B). Questi risultati si possono spiegare ammettendo l'esistenza di un nucleo formato, almeno nella parte esterna, da materiali allo stato fuso, in cui le onde P perdono velocità e le onde S non possono propagarsi.

**Figura B**

*La propagazione delle onde sismiche all'interno della Terra.*



mente proporzionale alla densità dei materiali (inoltre, le onde S non si propagano nei materiali allo stato liquido). Dall'analisi dei sismogrammi di un gran numero di terremoti, anche di quelli artificiali prodotti attraverso esplosioni atomiche sotterranee, si è potuto stabilire che **l'interno della Terra non è omogeneo** e che, **a diverse profondità, esistono delle superfici di discontinuità**, cioè superfici che separano strati con diverse caratteristiche (v. riquadro). Tenendo conto di ciò, e anche dei risultati degli altri metodi d'indagine prima elencati, gli scienziati hanno proposto un modello dell'interno della Terra che potremmo definire a involucri concentrici.

## 11.2 La struttura interna della Terra

Un modello dell'interno della Terra a involucri concentrici di differente composizione fu proposto, nel 1885, dal **geologo austriaco E. Suess** (1831-1914), che ipotizzò l'esisten-

Modello di Suess



Sial, Sima, Nife

za di tre strati, detti Sial, Sima e Nife, così chiamati dalle iniziali degli elementi chimici in essi prevalenti.

Il **Sial** (da **silicio** e **alluminio**) è lo strato esterno, di densità pari a  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , formato in prevalenza da silicati di alluminio. All'involucro sialico corrispondono le rocce acide eruttive.

Il **Sima** (da **silicio** e **magnesio**) è lo strato intermedio, di densità pari a  $3,4 \text{ g/cm}^3$ , ricco di silicati di ferro e magnesio. La parte superiore corrisponderebbe ai tipi più basici delle rocce magmatiche. Il **Nife** (da **nichel** e **ferro**) è il nucleo centrale, formato da un ammasso di ferro e nichel.

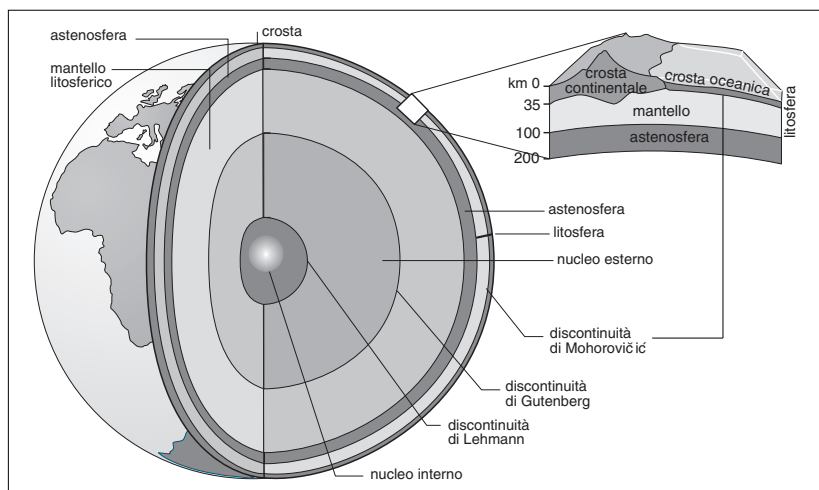
A questo modello, a cui si riconosce un valore storico, se ne è sostituito oggi un altro, molto più circostanziato, che, grazie allo studio della propagazione delle onde sismiche, ha permesso di stabilire che la Terra è effettivamente costituita da tre involucri fondamentali, diversi per spessore, composizione e densità, ai quali si dà il nome di **crosta**, **mantello** e **nucleo** (fig. 11.1).

## ■ La crosta

La **crosta terrestre** è lo strato più esterno: costituisce un involucro rigido e sottile, delimitato verso il basso dalla **discontinuità di Mohorovičić**, dal nome del suo scopritore, il geofisico jugoslavo A. Mohorovičić (1857-1936), detta anche più semplicemente **Moho**. La crosta terrestre viene distinta in crosta continentale, quella che costituisce i continenti, e crosta oceanica, che forma i fondali oceanici; esse

**Figura 11.1**

Struttura della Terra e della crosta terrestre.



differiscono per spessore, densità e composizione.

La **crosta continentale** ha uno spessore medio di 35-40 km, ma può arrivare fino a più di 70 km in corrispondenza delle più alte catene montuose. Ha una densità attorno a  $2,8 \text{ g/cm}^3$  ed è **composta essenzialmente da rocce granitiche**, via via più basiche procedendo dalla superficie verso la Moho. Inoltre, le rocce che la costituiscono possono avere diverse età, fino a circa 4 miliardi di anni.

La crosta  
continentale

La **crosta oceanica**, più sottile rispetto alla crosta continentale, ha uno spessore medio di circa 8-10 km e una densità media di  $3 \text{ g/cm}^3$  ed è **costituita da rocce basaltiche** ricche di alluminio, silicio, ferro. **La crosta oceanica risulta ovunque tripartita**: in superficie essa è coperta da uno spesso strato di **rocce sedimentarie**, soprattutto fanghi silicei e calcarei (strato 1), al di sotto si ritrova ovunque un grosso strato di **rocce eruttive basaltiche** (strato 2), che in profondità passa a **gabbro** (strato 3). L'età delle rocce che costituiscono la crosta oceanica non supera i 200 milioni di anni.

La crosta oceanica  
e i suoi tre strati

## ■ Il mantello

Al di sotto della discontinuità di Moho comincia il **mantello**, che **si estende fino alla discontinuità di Gutenberg, alla profondità di circa 2900 km**. La densità passa da circa  $3 \text{ g/cm}^3$  in prossimità della Moho sino a  $5,6 \text{ g/cm}^3$  nelle parti più profonde; in esso la temperatura aumenta da poche centinaia di gradi, vicino alla Moho, fino a più di  $300^\circ\text{C}$  presso la discontinuità di Gutenberg; anche la pressione aumenta con la profondità, da 9 kbar a circa 1400 kbar (1 kbar = 1000 bar, circa mille volte il valore della pressione atmosferica a livello della superficie terrestre). **Il mantello è composto da rocce dense e pesanti**, relativamente povere di silicio ma ricche di ferro e magnesio, dette **ultrabasiche**. Rocce di questo tipo, le peridotiti, affiorano solo in alcune zone della superficie terrestre e sono composte principalmente da minerali come i pirosseni e le olivine.

L'aumento  
della densità,  
della temperatura  
e della pressione

## ■ Il nucleo

Al di sotto della discontinuità di Gutenberg si trova il **nucleo**, un **grosso nocciolo il cui raggio misura circa 3470 km, più di metà del raggio terrestre**. La densità è di circa  $10 \text{ g/cm}^3$  a livello della discontinuità di Gutenberg e aumenta progressivamente fino a circa  $13,5 \text{ g/cm}^3$ , il che depone a favore dell'idea di un brusco cambiamento della composizione chimica; la temperatura sale da  $3000^\circ\text{C}$  in prossimità del mantello fino a oltre  $4000^\circ\text{C}$  al centro della Terra; anche la pressione aumenta da 1400 kbar fino a oltre 3600 kbar.

Un nocciolo  
di 6940 km  
di diametro

Nucleo esterno  
e nucleo interno

Ipotesi  
sulla composizione  
chimica del nucleo

Lo studio delle onde sismiche ha inoltre permesso di distinguere nel nucleo due strati: il **nucleo esterno**, liquido, in cui le onde sismiche di tipo S non si propagano, separato dalla discontinuità di Lehmann dal **nucleo interno**, solido.

In merito alla composizione chimica del nucleo, si possono fare solo delle ipotesi: attualmente si tende a credere che esso sia composto da una **lega di elementi come il ferro e il nichel, forse con l'aggiunta di altri elementi più leggeri, come lo zolfo e il silicio. Il nucleo è responsabile di una delle caratteristiche peculiari della Terra, la presenza di un campo magnetico terrestre.** Questo può essere registrato da strumenti come la bussola e anche dalle rocce al momento della loro formazione e nel tempo può subire variazioni tanto forti da portare allo scambio di posizione dei poli stessi (v. par. 11.6).

### 11.3 Litosfera, astenosfera e mesosfera

Una suddivisione  
di tipo geofisico

Negli ultimi decenni, i geologi hanno intensificato le ricerche sull'interno della Terra allo scopo di meglio comprendere fenomeni che in esso hanno origine, quali il vulcanismo, i sismi e l'orogenesi (dal greco *óros*, monte, e *gènesis*, nascita). Per questo motivo, alla suddivisione prima proposta, di tipo geochemico, da alcuni decenni gli scienziati sovrappongono una **suddivisione di tipo geofisico, basata sulla maggiore o minore rigidità degli strati** che costituiscono la Terra; alla divisione tra crosta e mantello si sovrappone, perciò, la distinzione in **litosfera, astenosfera e mesosfera** (fig. 11.1).

#### ■ La litosfera

La crosta e la parte  
superiore del  
mantello sono  
un'unica struttura

La distinzione fra crosta terrestre e mantello, segnata dalla Moho, non è ritenuta di primaria importanza per comprendere la dinamica dei fenomeni geologici della superficie terrestre. La Moho, infatti, corrisponde a una discontinuità soprattutto chimica fra crosta e mantello, ma dal punto di vista fisico la parte del mantello che sta subito al di sotto di questa discontinuità è collegata in modo rigido alla crosta sovrastante: in altre parole, **la crosta terrestre e la parte superiore del mantello costituiscono un'unica struttura rigida**, indicata con il nome di **litosfera** (dal greco *lithos*, pietra), il cui spessore varia da circa 70 km, sotto i bacini oceanici, a circa 100 km sotto i continenti, ma può raggiungere spessori di 300 km sotto le aree continentali più antiche. Se sottoposta a tensioni, la litosfera si comporta in modo prevalentemente rigido ed è suddivisa in un certo numero di placche, in movimento relativo tra loro, galleggianti sopra l'astenosfera (v. riquadro e cap. 12).

## ■ L'astenosfera

Sotto la litosfera si estende l'**astenosfera** (dal greco *asthenés*, debole), uno **strato composto da rocce a comportamento quasi plastico**, che sotto tensione si deformano senza fratturarsi. Essa comprende la parte restante del mantello superiore e in essa si originano i magmi che alimentano l'attività eruttiva dei vulcani. L'**astenosfera corrisponde allo strato in cui la velocità delle onde sismiche diminuisce bruscamente rispetto al mantello litosferico**: essa termina a una profondità di circa 200-300 km quando, con l'inizio del-

## L'ISOSTASIA

Le porzioni in cui è suddivisa la litosfera galleggiano sull'astenosfera plastica secondo modalità descritte dal principio dell'isostasia (dal greco *isos*, uguale, e *stásis*, stato); in base a questo principio, la crosta terrestre tende a raggiungere una condizione di equilibrio attraverso spostamenti verticali e orizzontali delle masse superficiali e profonde.

Le terre emerse sono più rilevate dei fondali oceanici, sia perché sono costituite da rocce più leggere, sia perché formate da una litosfera più spessa. Le rocce più comuni dei continenti sono a composizione granitica e risultano generalmente più leggere di quelle basaltiche, tipiche dei fondali oceanici. La diversità di peso fra graniti e basalti non basta, però, da sola a spiegare, per esempio, il forte dislivello tra la catena himalayana, che supera gli 8000 m di altitudine, e il fondo dell'oceano indiano, che raggiunge profondità superiori ai 10 000 m. Si ipotizza, dunque, che i continenti siano più rilevati dei fondali oceanici circostanti, perché costituiti da una litosfera molto più spessa. Da calcoli eseguiti risulta, infatti, che la litosfera continentale è spessa in media 100 km, contro i 70 km della litosfera oceanica. La situazione è analoga a quella di un tronco e di un ramoscello che galleggiano su uno specchio d'acqua: il tronco ha una parte emersa più rilevata sul pelo dell'acqua rispetto al ramoscello, ma ha anche una parte immersa molto più in profondità.

Secondo il principio dell'isostasia, le zolle

in cui la litosfera è fratturata galleggiano, per la loro relativa leggerezza, sull'astenosfera, che si comporta come un fluido particolarmente denso e pesante. Il principio dell'isostasia prevede anche che, se una certa porzione di crosta aumenta di peso, essa reagisce sprofondando e si solleva se accade il contrario oppure se l'aumento di peso non è accompagnato da un aumento di volume tale da rovesciarne gli effetti. Tutta la crosta terrestre tenderebbe a un riequilibrio isostatico per compensare gli effetti della dinamica profonda, che porta continuamente a ispessimenti di crosta, e quelli dell'erosione, che porta ad alleggerimenti. In base a considerazioni geofisiche, si pensa che questi spostamenti avvengano a profondità non molto elevata e che esista una superficie, detta di compensazione isostatica, situata a 60-100 km di profondità, al di sotto della quale cessano le variazioni di densità e si realizza uno stato permanente di equilibrio.

L'osservazione di quanto avviene lungo la costa scandinava conferma le precedenti considerazioni. Circa 20 000 anni fa, la Scandinavia era ricoperta da un *inlandis*, calotta glaciale spessa da 2000 a 3000 m. Sotto il suo peso, il continente è sprofondato per più di un centinaio di metri; quando il ghiaccio ha iniziato a fondere, il continente si è risollevato, ma a causa della viscosità del mantello il sollevamento è in ritardo rispetto all'alleggerimento post-glaciale ed è tuttora in atto, con velocità di circa 1 m al secolo.

la **mesosfera** (o astenosfera intermedia), le rocce ritornano allo stato solido e tali rimangono per tutto il mantello fino alla discontinuità di Gutenberg.

### ■ La mesosfera

La mesosfera comprende il mantello intermedio e il mantello inferiore e si spinge fino a circa 2900 km di profondità, in corrispondenza della discontinuità di Gutenberg, che segna il confine con il nucleo. Nella mesosfera la densità delle rocce, che sono solide, aumenta gradualmente con la profondità. Testimonianza della presenza di rocce solide, in questa che viene chiamata anche astenosfera intermedia, è il leggero aumento della velocità delle onde sismiche rispetto all'astenosfera. **Al di sotto dell'astenosfera intermedia vi è l'astenosfera profonda**, che ha inizio a circa 400 km, con caratteristiche simili alla precedente, ma con una maggiore velocità delle onde sismiche.

## 11.4 Il campo gravitazionale terrestre

Il rapporto tra massa e volume della Terra

Semplici considerazioni sul volume e sulla massa della Terra ci permettono di concludere che il suo interno non è omogeneo. Si consideri, in prima approssimazione, la Terra come una sfera di raggio pari a 6370 km: ricordando la formula del volume della sfera, da ciò si può ricavare che il volume della Terra ( $V$ ) è pari a  $1,08 \cdot 10^{21} \text{ m}^3$ . Dalle leggi della fisica sull'attrazione gravitazionale tra i corpi nell'universo, si ricava inoltre la misura della massa terrestre ( $m$ ), che è pari a  $5,98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ . Da questi due dati si può risalire alla densità media ( $d = m/V$ ) della Terra, che vale  $5,54 \text{ g/cm}^3$ . Poiché le rocce che costituiscono la crosta terrestre, accessibili all'osservazione diretta, hanno una densità media tra  $2,7$  e  $3 \text{ g/cm}^3$ , si può dedurre che i materiali che si trovano a maggiori profondità hanno una densità più elevata, intorno a  $10\text{-}13 \text{ g/cm}^3$ .

Variazioni del campo gravitazionale

**Variazioni locali** che si registrano nel campo gravitazionale terrestre (intendendo per campo gravitazionale una zona di spazio intorno a un corpo dotato di massa, in cui altre masse risentono della sua attrazione) indicano che all'interno della Terra la densità non è distribuita in modo omogeneo. Il valore medio teorico dell'accelerazione di gravità  $g$  è pari a  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Ma misure di  $g$ , effettuate in diversi punti della superficie terrestre attraverso strumenti detti gravimetri, hanno evidenziato che esistono differenze tra il valore teorico medio di  $g$  e quello misurato, differenze che si attribuiscono alla disomogenea distribuzione dei materiali all'interno della Terra.

Lo studio delle **anomalie di gravità**, cioè le differenze tra il valore reale misurato e quello teorico medio, è importante per poter rilevare strutture a densità diverse sepolte in profondità. Esso risulta, inoltre, un buon metodo di prospezione del sottosuolo per la ricerca di depositi petroliferi e di rocce ricche di minerali.

Anomalie di gravità

## 11.5 Il calore terrestre

La Terra è un corpo caldo in equilibrio dinamico; in altre parole, il suo riscaldamento non aumenta costantemente perché disperde il calore prodotto al suo interno. Come mostrano l'attività vulcanica e il flusso di calore proveniente dagli strati profondi, **l'interno della Terra si trova a una temperatura assai elevata**. L'origine del calore interno della Terra è legata a due fattori: al raffreddamento dell'originaria massa planetaria e alla produzione di calore per decadimento degli isotopi radioattivi (v. a p. 95) presenti nelle rocce. In base a considerazioni fondate sull'età della Terra, oggi si ritiene che la seconda causa sia preponderante rispetto alla prima.

Un corpo caldo in equilibrio dinamico

**L'aumento della temperatura in funzione della profondità è detto gradiente geotermico**. Esso può essere misurato direttamente, durante perforazioni della superficie terrestre, solo per i primi chilometri della litosfera, per i quali si è potuto osservare che la temperatura aumenta mediamente di circa 1 °C ogni 33 m.

Il gradiente geotermico

Tuttavia, se il gradiente geotermico si mantenesse costante anche a maggiori profondità, dovremmo ipotizzare temperature di circa 30 000 °C già a profondità di 1000 km, tali cioè da mantenere allo stato fuso gran parte dell'interno della Terra. Dallo studio delle onde sismiche, sappiamo però che solo il nucleo esterno è liquido, mentre gli altri strati della Terra sono costituiti da materiali allo stato solido: queste considerazioni portano dunque a **ipotizzare che il gradiente geotermico diminuisca all'aumentare della profondità**. Si ammette per il mantello un gradiente geotermico che ne porterebbe la temperatura a circa 1500-2000 °C; per il nucleo si ipotizzano temperature comprese tra 2000 e 6000 °C.

L'andamento del gradiente geotermico

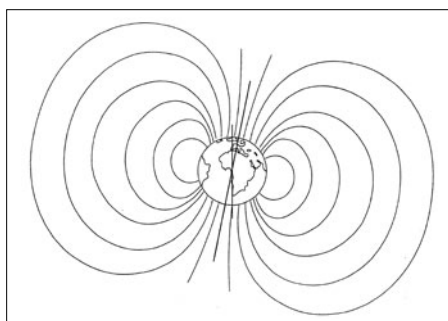
**Oltre alla componente verticale del gradiente geotermico, esiste anche una componente orizzontale**, probabilmente legata a imponenti moti convettivi nel mantello (v. a p. 155): al di sotto della litosfera si formano delle correnti ascendenti calde e discendenti fredde, che si muovono molto lentamente; a questi movimenti si attribuisce l'origine dei fenomeni orogenetici e sismici profondi.

## 11.6 Il campo magnetico terrestre

Già nel 1600, si sosteneva che “tutta la Terra fosse un grosso magnete”, che genera un campo magnetico che fa sentire i suoi effetti sul piccolo magnete dell'ago della bussola, così da allinearli secondo l'asse nord-sud. Oggi la maggioranza degli studiosi crede che il campo magnetico terrestre possa essere paragonato a quello di una sfera uniformemente magnetizzata, caratterizzata da due poli magnetici, che non coincidono, però, con i due poli Nord e Sud geografici (fig. 11.2).

La **struttura del campo magnetico** terrestre mostra che esso può considerarsi generato prevalentemente da un **dipolo magnetico, situato nel centro della Terra** e inclinato di  $11^{\circ}30'$  rispetto all'asse terrestre. I punti in cui l'asse del dipolo incontra la superficie terrestre sono detti **poli geomagnetici**. Il polo geomagnetico situato nell'emisfero boreale si indica convenzionalmente con B e si trova a  $78^{\circ}30' N$ ,  $69^{\circ} W$ ; il polo geomagnetico situato nell'emisfero australe si indica convenzionalmente con A e si trova a  $78^{\circ}30' S$ ,  $111^{\circ} E$ . In realtà, l'origine del campo magnetico non è ancora del tutto chiarita e attualmente si ipotizza che esso possa essere generato dal movimento di cariche elettriche (ipotesi della dinamo ad autoeccitazione).

Si può applicare alla Terra il **modello della dinamo**, immaginando: 1) la presenza iniziale di un debole campo magnetico non uniforme; 2) la presenza di un nucleo fuso, buon conduttore; 3) la possibilità di movimenti nel nucleo stesso. I movimenti nel nucleo fuso inducono una corrente che produce un campo magnetico nuovo, che a sua volta induce una nuova corrente nel nucleo, che da parte sua provoca un nuovo campo magnetico e così via. Date queste caratteristiche, il modello è stato chiamato della “**dinamo ad autoeccitazione**”. Si pensa che le sorgenti di energia più probabili per mante-



**Figura 11.2**  
Rappresentazione  
del campo  
magnetico terrestre  
(con evidenziate  
le linee di forza  
che si estendono  
nello spazio).

Struttura del campo  
magnetico

I poli magnetici

Il modello  
della dinamo

Dinamo  
ad autoeccitazione

nere il movimento all'interno del nucleo siano dei movimenti di calore all'interno del nucleo, paragonabili a quelli che si sviluppano in un liquido messo a bollire (moti convettivi).

## ■ Il paleomagnetismo

Studi compiuti negli anni Cinquanta evidenziarono che in passato si sono verificate variazioni dell'intensità e anche inversioni di polarità del campo magnetico terrestre. Lo studio di tali cambiamenti prende il nome di **paleomagnetismo**, o **magnetismo fossile**, e ha contribuito in modo rilevante alla scoperta dell'espansione dei fondali oceanici e alla formulazione della teoria della tettonica a placche (v. par. 12.2 a p. 149).

In particolare, si sono fatte alcune scoperte.

- Il campo magnetico della Terra si è **invertito varie volte rispetto a quello attuale**, come se i poli si fossero scambiati di posto; le inversioni di polarità si riconoscono quando, in colate basaltiche successive, in corrispondenza delle dorsali medio-oceaniche (sorta di fessure sul fondale oceanico, da cui fuoriesce magma proveniente dall'astenosfera), si riscontrano direzioni del campo magnetico divergenti di 180°. Tale fenomeno è una prova utilizzata a favore dell'espansione dei fondi oceanici.

- Il campo magnetico ha subito rilevanti migrazioni rispetto alla crosta terrestre, suffragando così l'**ipotesi della migrazione dei poli**. Così sembrerebbe che il polo nord magnetico si sia spostato verso nord per un lungo periodo di tempo a partire dal Permiano (circa 320 milioni di anni fa), quando si trovava alla latitudine di 5° N.

- Le interpretazioni paleomagnetiche tratte da rocce coeve in diversi continenti hanno indicato diverse posizioni dei poli, suggerendo la probabilità di una deriva dei continenti da quando le rocce si sono formate.

**Informazioni riguardo al magnetismo fossile si ottengono dallo studio di molte rocce ignee (lave basaltiche) e sedimentarie (arenarie rosse), contenenti minerali magnetici** che registrano fedelmente la direzione del campo magnetico presente al momento della loro formazione. Quando la temperatura di un magma scende al di sotto di un valore detto **punto di Curie** (diverso a seconda del minerale), i minerali magnetizzabili (per esempio, la magnetite) cristallizzano, magnetizzandosi secondo la direzione del campo magnetico esistente in quel momento. Ciò può avvenire sia quando un magma solidifica in profondità, dando origine a una roccia intrusiva, sia quando una lava effusa si raffredda sulla superficie terrestre. **Nel caso di rocce sedimentarie** clastiche, quando avviene la deposizione del materiale detritico sul fondo di un

Lo studio delle variazioni del magnetismo terrestre

Inversione della polarità magnetica

Migrazione dei poli magnetici

Paleomagnetismo e deriva dei continenti

Gli strumenti del paleomagnetismo



Conseguenze  
dell'inversione  
dei poli magnetici

bacino sedimentario (per esempio, un lago), le particelle di minerali magnetizzabili presenti si orientano secondo la direzione del campo magnetico presente in quel momento sulla Terra.

Dagli studi effettuati, si è potuto stabilire che **l'inversione dei poli magnetici sia avvenuta circa ogni 500 000-600 000 anni**; tuttavia, non sono ancora state chiarite le cause e le modalità del fenomeno. Alcuni scienziati ipotizzano che l'inversione dei poli magnetici abbia una grande importanza per la sopravvivenza di interi gruppi di organismi. Infatti, nei momenti di inversione la schermatura magnetica, che normalmente protegge la Terra da alcune radiazioni solari, è meno efficace e quindi aumentano d'intensità gli effetti nocivi di alcune radiazioni solari su interi gruppi di organismi viventi. Proprio per ciò, molti studiosi collegano le estinzioni di intere famiglie faunistiche, come i dinosauri o le ammoniti, con momenti di inversione del campo magnetico terrestre.

## GLOSSARIO

### **Astenosfera**

Strato più esterno del mantello della Terra, compreso fra i 60 e i 200-300 km di profondità, al di sotto della litosfera, a comportamento essenzialmente plastico, con possibili correnti orizzontali di materia.

### **Discontinuità, superficie di**

Superficie di separazione fra involucri della Terra aventi costituzione o stato fisico diversi e in corrispondenza dei quali si verificano modificazioni nella propagazione delle onde sismiche.

### **Gradiente geotermico**

Innalzamento di temperatura all'interno della Terra, pari a un grado ogni 30 metri di profondità.

### **Ipocentro**

Zona di piccole dimensioni assimilabili a un punto, dalla quale si propaga l'energia di un terremoto.

### **Isostasia, principio della**

Principio fisico per il quale un corpo immerso in un liquido sporge tanto più sopra la superficie del liquido quanto più grande è il volume della sua parte immersa.

### **Litosfera**

Strato superficiale della Terra, che comprende la crosta terrestre e la parte superiore del mantello, a comportamento rigido.

### **Moho**

Superficie di discontinuità che indica il passaggio dalla crosta terrestre al sottostante mantello.

### **Paleomagnetismo**

Studio dei mutamenti del campo magnetico terrestre nelle ere geologiche, alla base dell'inversione magnetica, registrati in particolare nelle rocce ignee.

## TEST DI VERIFICA

**1** Quale parte dell'interno della Terra ha la massima densità?

- a crosta;
- b mantello;
- c nucleo interno;
- d nucleo esterno;
- e crosta continentale.

**2** La Moho è:

- a una catena montuosa;
- b una discontinuità;
- c un tipo di roccia;
- d uno degli strati in cui è diviso l'interno della Terra.

**3** La discontinuità di Gutenberg si trova alla profondità di:

- a 35 km;
- b 2900 km;
- c 5100 km;
- d tra 20 e 70 km;

**4** La litosfera è composta da:

- a solo crosta terrestre;
- b tutto il mantello;
- c crosta terrestre e parte del mantello superiore;
- d astenosfera e mesosfera.

**5** Il mantello è separato dal nucleo dalla:

- a discontinuità di Lehmann;
- b discontinuità di Gutenberg;
- c discontinuità di Mohorovičić;
- d nessuna delle precedenti.

**R**

1 c; 2 b; 3 b; 4 c; 5 b

# 12 Le teorie tettoniche

---

*Fin dalla sua origine, circa 4,5 miliardi di anni fa, il pianeta Terra è stato, ed è tuttora, soggetto all'azione di forze che ne modificano continuamente l'aspetto: un ipotetico osservatore, vissuto sulla Terra molti milioni di anni fa, avrebbe potuto osservare i continenti in posizioni diverse da quelle attuali; inoltre, si può rilevare come la distribuzione delle catene montuose e delle sedi di alcuni fenomeni, quali il vulcanismo e i sismi, non è casuale, ma sembra seguire uno schema preferenziale. Dello studio e dell'interpretazione di questi fenomeni si occupa un ambito della geologia, detto **tettonica** (dal greco tektoniké, arte del costruire).*

*Un primo tentativo di spiegare le modificazioni avvenute sulla litosfera si deve alla teoria della **deriva dei continenti**, formulata all'inizio del '900: in passato i continenti sarebbero stati tutti uniti e si sarebbero in seguito progressivamente spostati e allontanati.*

*Tuttavia, non erano chiare le cause di tali spostamenti; molte informazioni utili in questo senso furono raccolte qualche decennio più tardi, attraverso l'**esplorazione dei fondali oceanici**: alla fine degli anni '60, la loro interpretazione permise di formulare la **teoria della tettonica a placche**, secondo la quale la litosfera terrestre è costituita da una serie di porzioni, o **placche**, in movimento reciproco, causato da **moti convettivi** che avvengono nel mantello.*

## 12.1 La deriva dei continenti

Osservando su un planisfero i profili della costa occidentale africana e di quella orientale del Sud America, si può notare come esista tra loro una perfetta corrispondenza. Questa constatazione, supportata da una serie di prove, consentì al meteorologo tedesco **A. Wegener** (1880-1930) di formulare, nel 1915, la **teoria della deriva dei continenti**: secondo questa teoria, circa 240 milioni di anni fa tutte le terre emerse si sarebbero trovate riunite in un unico grande blocco, un supercontinente chiamato **Pangea** (dal greco *pán*, tutto, e *géa*, terra), circondato da un unico oceano detto **Panthalassa** (dal greco *pán*, tutto, e *thálassa*, mare). In seguito, circa 180 milioni di anni fa, la Pangea si sarebbe divisa in due grandi parti: a nord, la **Laurasia**, costituita dalle attuali porzioni del Nord America, della Groenlandia, dell'Europa e dell'Asia; a sud, il **Gondwana**, formato dalle attuali porzioni del Sud America, dell'Africa, dell'India, dell'Austra-

La formulazione  
di Wegener

Pangea,  
Panthalassa,  
Laurasia, Gondwana

**Figura 12.1***La deriva dei continenti.*

lia e dell'Antartide; questi due grossi blocchi, separati da un oceano chiamato **Tetide** (da Teti, nome della divinità greca del mare), si sarebbero poi successivamente divisi e progressivamente allontanati l'uno dall'altro, "andando alla deriva" e originando gli attuali continenti (fig. 12.1).

Wegener riteneva che i continenti, formati di materiale relativamente poco denso (mediamente simile al granito e chiamato Sial), galleggiassero come zattere su un involucro fluido sottostante di materiale più denso (simile al basalto e chiamato Sima; v. a p. 136).

Oltre alla già citata corrispondenza fra le coste dei continenti, la teoria formulata da Wegener era avvalorata anche da prove geologiche, paleoclimatiche e paleontologiche. Esiste una **continuità fra le rocce che si trovano lungo le coste dei continenti sudamericano e africano**, attualmente separati dall'oceano Atlantico, e ciò ne testimonierebbe un'origine comune, a cui avrebbe fatto seguito la loro separazione.

Prove geologiche

**L'analisi di rocce sedimentarie** rinvenute in alcune aree del pianeta **indica che esse si sono originate in zone con climi diversi da quelli propri delle latitudini a cui ora si trovano**; quest'apparente contraddizione si può spiegare ammettendo che i continenti non siano sempre stati alle latitudini attuali, ma che si siano spostati.

Prove paleoclimatiche

Esistono **notevoli affinità tra i fossili di organismi terrestri ritrovati sulle due coste dell'oceano Atlantico**. In un primo tempo, si ipotizzò l'esistenza di "ponti continentali", cioè sottili strisce di terra che attraversavano l'oceano e che avrebbero permesso agli organismi di spostarsi; tuttavia, questa possibilità fu poi esclusa e la presenza di questi fossili fu spiegata ammettendo che, in alcuni periodi della storia della Terra, continenti oggi distanti tra loro fossero uniti e popolati da organismi della stessa specie.

Prove paleontologiche

La "rivoluzionaria" teoria della deriva dei continenti fu fortemente osteggiata dai geologi contemporanei di Wegener, anche perché non venivano chiarite le cause degli sposta-

menti e, d'altra parte, non si conoscevano forze tanto potenti da provocare il movimento dei continenti; secondo Wegener, i continenti sarebbero andati alla deriva come iceberg che si muovono sul mare, sotto l'effetto di forze gravitazionali differenziali, legate alla forma della Terra, o di rigonfiamenti della superficie terrestre che indurrebbero la crosta a spostarsi per ristabilire l'equilibrio (queste supposizioni, comunque, non erano dimostrate).

La teoria della deriva dei continenti cadde in oblio fino agli anni '60, quando fu nuovamente presa in considerazione in seguito alle rilevanti scoperte che si andavano accumulando grazie all'esplorazione dei fondali oceanici.

## 12.2 L'esplorazione dei fondali oceanici

Gli strumenti  
della ricerca  
oceanografica

La **ricerca oceanografica** si basa su un insieme di mezzi speciali di esplorazione, tra cui navi oceanografiche, batiscafi e laboratori sommersi, ai quali si sono aggiunti più recentemente i satelliti artificiali.

Le profondità oceaniche vengono studiate soprattutto per mezzo di dragaggi, perforazioni e l'impiego di strumenti quali magnetometri (che misurano l'intensità del campo magnetico terrestre) ed ecoscandagli (che, inviando segnali acustici verso i fondali, consentono di valutarne la profondità in base al tempo impiegato dal segnale a compiere il tragitto di andata e ritorno).

Le dorsali oceaniche

I risultati delle numerose spedizioni oceanografiche condotte negli anni '60 hanno permesso di descrivere in modo dettagliato i fondali, la cui morfologia risulta alquanto varia e movimentata; inoltre, si è potuta rilevare la presenza di lunghe fratture, le **dorsali oceaniche**, interessate da un elevato flusso di calore endogeno e si sono potuti valutare il debole spessore e l'età relativamente giovane dei sedimenti marini; una circostanza che, tuttavia, si rivelò di fondamentale importanza fu la scoperta del **paleomagnetismo** e delle inversioni periodiche del campo magnetico terrestre, registrati nelle rocce dei fondali oceanici (v. a p. 143).

Anomalie  
magnetiche

Le misurazioni del campo magnetico compiute in mare aperto hanno evidenziato la presenza di **anomalie magnetiche**, cioè di piccolissime deviazioni in più (positive) o in meno (negative) rispetto ai valori normali medi dell'intensità del campo magnetico terrestre. Le anomalie positive sono dovute al fatto che in una data zona di crosta, sede di magnetismo fossile, quest'ultimo ha orientazione uguale a quella del campo magnetico attuale e vi si somma; l'opposto accade nelle zone sedi di anomalie magnetiche negative. **Le ano-**

**malie magnetiche** positive e negative **sono distribuite alternativamente**, secondo fasce lineari e parallele, **con simmetria bilaterale rispetto alla dorsale oceanica**. Esse rappresenterebbero, dunque, la prova che la crosta oceanica si è formata in tempi diversi e che essa è tanto più antica quanto più ci si allontana dall'asse della dorsale; inoltre, a distanza crescente dalla dorsale si trovano spessori sempre più alti dei sedimenti.

### ■ La teoria dell'espansione dei fondali oceanici

I risultati delle ricerche oceanografiche permisero nel 1963 agli scienziati inglesi F.J. Vine e D.H. Matthews, i quali si avvalsero di ipotesi avanzate nel 1960 del geologo americano Harry H. Hess, di formulare la **teoria dell'espansione dei fondali oceanici**.

Secondo questa teoria, il magma che risale dal mantello in corrispondenza delle dorsali oceaniche, solidificandosi, forma nuova crosta terrestre, che si sposta poi lateralmente sui due fianchi della dorsale, provocando così l'espansione dei fondali oceanici alla velocità di pochi centimetri all'anno.

Di conseguenza, a meno che la crosta terrestre non si stia progressivamente accrescendo (ma non abbiamo dati che lo confermino), la formazione di nuova litosfera terrestre in corrispondenza delle dorsali oceaniche deve essere compensata dalla distruzione (cioè dallo sprofondamento nel mantello) di una quantità paragonabile di litosfera in altri luoghi della superficie terrestre: tale fenomeno avviene, in effetti, in corrispondenza delle zone cosiddette di **subduzione** (fosse oceaniche).

Il processo di formazione dei fondali oceanici

## 12.2 La teoria della tettonica a placche

Tra la fine degli anni Sessanta e l'inizio degli anni Settanta, i risultati delle numerose ricerche condotte sui fondali oceanici permisero di dare una risposta alla domanda lasciata inesa dalla teoria della deriva dei continenti (che cosa permette ai continenti di spostarsi?) e, con il contributo di numerosi scienziati, si giunse alla formulazione della **teoria della tettonica a placche**, che può essere compendiata nei seguenti punti:

- la **litosfera terrestre**, involucro rigido più esterno, non possiede una struttura continua, ma **si presenta fratturata in una ventina di porzioni**, dette **placche** (o zolle);
- le **placche galleggiano sulla sottostante astenosfera** e si spostano orizzontalmente, trasportando con sé continenti e oceani;

I punti essenziali della teoria

- dal punto di vista meccanico, le **placche si comportano come corpi rigidi** e, se vengono sollecitate da forze di notevole intensità, si fratturano;
  - le **placche possono allontanarsi, scontrarsi o scorrere** le une rispetto alle altre (v. par. 12.3);
  - lo **spostamento delle placche è causato dai moti convettivi** che avvengono nel mantello (v. par. 12.4);
  - i **movimenti delle placche sono responsabili dell'orogenesi e dell'attività vulcanica e sismica** e questi fenomeni si manifestano lungo i bordi di confine o i margini delle placche (mentre la loro parte interna ne è esente).
- Questo aspetto, in particolare, mette in luce il carattere potentemente unificante della teoria della tettonica delle placche, che è in grado di interpretare e spiegare globalmente i fenomeni endogeni (che si originano all'interno della Terra) e la loro particolare distribuzione.

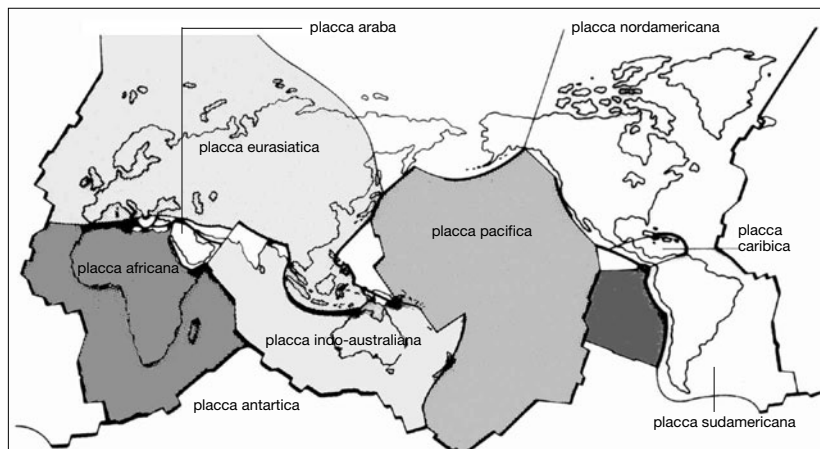
Sono state individuate **sette placche principali**, aventi grande estensione – pacifica, nordamericana, sudamericana, eurasiatica, africana, indo-australiana e antartica – e **un certo numero di placche minori** (dette anche **microzolle**), tra cui ricordiamo le placche di Nazca, di Cocos, caraibica, delle Filippine e araba (fig. 12.2).

Alcune placche sono costituite solo da litosfera oceanica (per esempio, la placca pacifica), altre, invece, sono formate da litosfera sia continentale, sia oceanica (per esempio, la placca africana) e altre ancora sono costituite prevalentemente da litosfera continentale (per esempio, la placca eurasiatica).

Placche principali e microzolle

### Figura 12.2

*Le principali placche in cui è fratturata la litosfera.*



## 12.3 I margini delle placche

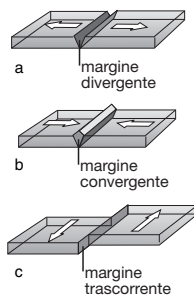
Le placche interagiscono reciprocamente attraverso i margini e, come abbiamo anticipato, è lungo queste linee di confine instabili che si focalizzano i vari fenomeni endogeni. A seconda del tipo di interazione che avviene fra due placche fra loro in contatto, si possono distinguere tre diversi tipi di margini: costruttivi, o divergenti; distruttivi, o convergenti; conservativi, o trascorrenti (fig. 12.3).

### ■ I margini costruttivi, o divergenti

In corrispondenza di questo tipo di margini si genera nuova crosta terrestre per solidificazione di magma che risale dalla sottostante astenosfera (per questo sono detti **costruttivi**) e, nello stesso tempo, le due placche adiacenti divergono fra loro (per questo sono detti anche **divergenti**), allontanandosi a una velocità che può essere anche di qualche centimetro all'anno.

I margini costruttivi coincidono con le dorsali medio-oceaniche o con lacerazioni della crosta continentale, lungo cui si incide una valle, detta **fossa tettonica** o **rift valley** continentale (o semplicemente **rift**).

Le dorsali medio-oceaniche sono rilievi sottomarini, fasce di crosta oceanica inarcate verso la superficie, più o meno fratturate. La cresta della dorsale è caratterizzata da fenomeni sismici ed è segnata da un solco longitudinale, il **rift**, largo qualche decina di chilometri e profondo alcune centinaia di metri, da cui fuoriesce in continuazione un magma fluido e molto caldo, di natura basaltica. Questo magma man mano solidifica, formando una nuova crosta terrestre e allontanando le placche adiacenti, che divergono rispetto alla posizione originaria con velocità che vanno dai 2 ai 10 cm/anno; esso, inoltre, può effondere in superficie, raffreddarsi e solidificarsi immediatamente, formando blocchi di lava di forma arrotondata a cui si dà il nome di **lava a cuscino**, o **"a pillow"**, che rotolano per brevi tratti nei pressi della zona di emersione. Le dorsali medio-oceaniche sono interrotte e suddivise in segmenti distinti (disposti trasversalmente rispetto alla cresta della dorsale) da fratture dette **faglie trasformi** (v. a p. 161). Sul fondo degli oceani Atlantico, Indiano, Artico e Pacifico, del mare di Norvegia e del mare Artico si snoda senza soluzione di continuità un sistema di dorsali lungo oltre 80 000 km. Una delle più famose è la **dorsale medio-atlantica**, che si eleva per circa 2500-3000 m al di sopra delle adiacenti piane abissali e provoca l'allontanamento delle zolle nordamericana e sudamericana da quelle eurasiatica



**Figura 12.3**

*I margini delle placche e movimenti relativi: due placche adiacenti possono allontanarsi (a), scontrarsi (b) o scorrere l'una rispetto all'altra (c).*

Le "rift valley" medio-oceaniche

La dorsale medio-atlantica



Le "rift valley"  
continentali

e africana, con conseguente espansione dell'oceano Atlantico; in alcuni punti, la dorsale medio-atlantica affiora, dando così origine a isole vulcaniche quali l'Islanda e le Azzorre.

**Le rift valley continentali sono depressioni più piccole e meno profonde delle dorsali oceaniche**, che si aprono nella litosfera continentale; esse possono essere occupate da laghi (laghi tettonici) e determinare successivamente la formazione di nuovi mari e oceani in seguito all'ingresso, parziale e intermittente, delle acque marine nella depressione. L'esempio più conosciuto è quello che si estende con direzione nord-sud in **Africa orientale**, detto **Great Rift Valley**, in cui sono attualmente osservabili vari laghi tettonici (Turkana, Mobutu, Tanganica e Malawi) e che, probabilmente, segna la futura frammentazione del continente africano.

### ■ I margini distruttivi, o convergenti

In corrispondenza di questo tipo di margini, la litosfera si consuma e si distrugge (perciò sono detti **distruttivi**), andando in **subduzione** (dal latino *subducere*, condurre sotto), cioè immergendosi nella sottostante astenosfera, e contemporaneamente le due placche adiacenti si avvicinano reciprocamente (perciò sono detti **convergenti**), cioè si scontrano. I fenomeni che si manifestano in seguito allo scontro di due placche sono diversi, a seconda che la collisione coinvolga due placche oceaniche, due placche continentali o una placca oceanica e una continentale.

Collisione tra  
placche oceaniche

**La collisione tra due placche oceaniche provoca la subduzione**, quindi la distruzione, **della densa litosfera oceanica** in pieno oceano; la litosfera si incurva verso il basso, immergendosi nell'astenosfera, secondo un piano inclinato in cui si localizza un'intensa attività sismica, detto piano di Benioff. Scesa nell'astenosfera, la litosfera oceanica comincia a fondere, determinando un'accentuata attività vulcanica.

Come conseguenza della collisione, nei fondali oceanici si formano profonde depressioni, dette fosse oceaniche, e, parallelamente a esse, archi magmatici insulari, cioè fasce di isole vulcaniche originatesi per risalita verso la superficie di magma proveniente dalla fusione della litosfera. Nel loro insieme, le fosse oceaniche e gli archi magmatici insulari costituiscono i cosiddetti sistemi arco-fossa, di cui si trovano numerosi esempi lungo le coste occidentali dell'oceano Pacifico (per esempio, lungo l'arcipelago del Giappone o lungo le isole Marianne, presso l'omonima fossa).

Collisione tra  
placche continentali

**La collisione fra due placche continentali** non dà luogo a subduzione, perché, a causa della bassa densità delle rocce che costituiscono la litosfera continentale, nessuna delle due

placche collidenti può inserirsi sotto all'altra; la collisione porta a **sovrascorrimenti delle due placche, al corrugamento della litosfera e determina**, dunque, la formazione di catene montuose, od **orogenesi** (dal greco *orós*, montagna, e *gènesis*, origine), che viene descritta per esteso nel riquadro a p. 154). In seguito all'attrito fra le due placche, si generano inoltre, nell'area interessata dalla collisione, forti tensioni che causano terremoti. Esempi di catene montuose formatesi in questo modo sono la catena himalaiana (per collisione della placca indiana contro quella eurasiatica) e quelle alpina e appenninica (per collisione della placca africana contro quella eurasiatica).

La collisione fra un placca continentale e una oceanica, più densa, fa sì che quest'ultima vada in subduzione, inserendosi sotto la placca continentale e immergendosi nell'astenosfera, secondo il piano di Benioff.

Collisione fra placca continentale e placca oceanica

Le conseguenze di questo scontro sono in parte simili a quanto avviene in seguito alla collisione tra due placche oceaniche: **la subduzione della placca oceanica forma**, infatti, delle **profonde fosse oceaniche e sulla placca continentale si origina un arco magmatico, costituito da una serie di vulcani con andamento parallelo alla fossa**. Proseguendo la subduzione, però, la placca continentale si corruga e, **dietro all'arco magmatico, si forma una catena montuosa**, il cui sollevamento continua finché la subduzione è attiva.

Questa situazione si osserva lungo la costa sudorientale dell'Oceano Pacifico, in corrispondenza alla fossa del Perù-Cile (originatasi per subduzione della placca di Nazca sotto alla placca sudamericana), parallelamente alla quale si estende la catena montuosa delle Ande (formata da due cordigliere parallele, una occidentale e una orientale; v. riquadro a p. 160).

### ■ I margini conservativi, o trasformati

In corrispondenza di questo tipo di margini, la litosfera non si accresce né si consuma (perciò sono detti **conservativi**), mentre le placche adiacenti **scivolano**, scorrono l'una rispetto all'altra generando fratture sia sui continenti, sia sui fondali oceanici, a cui si dà il nome di **faglie trasformi** (v. a p. 161) e che sono sede di terremoti (perciò i margini conservativi sono anche detti **trasformati**). Come è già stato detto a p. 151, faglie trasformi si osservano lungo le dorsali oceaniche, che risultano così suddivise in tronconi relativamente corti, scorrenti lateralmente l'uno rispetto all'altro. Le faglie trasformi, che interrompono il per-

Le faglie trasformi

## L'OROGENESI

La parola orogenesi significa "origine delle montagne". Sono dette teorie orogeneiche quelle che cercano di spiegare l'orogenesi, cioè l'origine delle catene montuose.

Anticamente si riteneva che le montagne fossero entità immutabili, create con la Terra e destinate a mantenere costanti forma e altezza. A metà del XV secolo vennero scoperti fossili di antichi organismi marini in rocce delle Alpi e, di conseguenza, cominciò a farsi strada l'ipotesi che le montagne non fossero entità immutabili, ma potessero trarre origine dai fondali marini, emergersi a causa di vari fenomeni.

Tutte le catene montuose sono formate in prevalenza da rocce sedimentarie di origine marina, profondamente modificate per metamorfismo, deformate e attraversate da faglie (v. cap. 13) e da rocce ignee di età più recente.

Il processo orogenetico può quindi essere diviso in due fasi: quello della sedimentazione e quello della compressione dei sedimenti e del loro sollevamento. La seconda fase può avvenire in seguito a due diversi tipi di interazione fra le placche: per subduzione di una placca ocea-

nica sotto una placca continentale o per collisione tra due placche continentali. Un esempio di catena montuosa formata in zona di subduzione sono le Ande: la subduzione della placca oceanica di Nazca sotto a quella continentale sudamericana ha provocato prima la formazione di un arco magmatico (cordigliera occidentale in cui si trovano numerosi vulcani) e poi, continuando la subduzione, il sollevamento della cordigliera orientale.

Le Alpi e l'Himalaia sono, invece, esempi di catene montuose formate per collisione tra due placche continentali, rispettivamente della placca africana contro quella eurasiatica e di quella indiana contro quella eurasiatica.

Nelle catene montuose sono normali spessori litosferici di 70 km, raddoppiati rispetto agli spessori originari. L'ispessimento, associato alla pressione esercitata direttamente dalle placche in collisione, porta a un forte aumento della temperatura e della pressione: perciò le rocce lentamente ricristallizzano, trasformandosi (per metamorfismo) in rocce costituite da minerali completamente diversi da quelli originari (v. cap. 10).

corso delle dorsali, sono scarpate molto ripide, quasi verticali, sedi di frequenti terremoti solamente nel tratto che raccorda i due tronconi della dorsale, in cui l'ipocentro dei terremoti è sempre superficiale e l'energia che essi liberano relativamente bassa.

La **più famosa faglia** osservabile **sulle terre emerse**, invece, è **quella di San Andreas**, in California: lungo questa faglia, spostandosi verso nord-ovest, la placca Pacifica "striscia" contro quella nordamericana, in movimento verso sud-est, tagliando in due la penisola californiana (da San Francisco a Los Angeles). Faglie di questo tipo, in cui i due margini della faglia si allontanano orizzontalmente in direzioni opposte, sono dette **faglie trascorrenti**. La faglia di San Andreas è sede di un'intensa attività sismica, manifestatasi più volte nel corso del '900 e causata dagli attriti fra le placche, i quali, a loro volta, generano forti tensioni nelle rocce della litosfera.

La faglia  
di San Andreas

## 12.4 La causa del movimento delle placche

Qual è la causa che provoca il movimento delle placche? Secondo una teoria che incontra il favore di molti scienziati, ma che è soggetta a talune riserve, **il movimento delle placche litosferiche sarebbe provocato dai moti convettivi che avvengono nel mantello.**

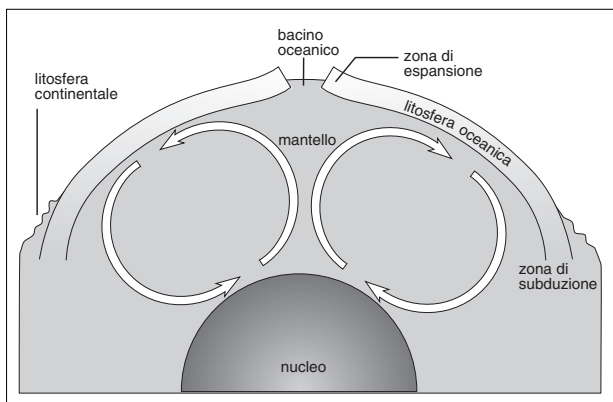
### ■ I moti convettivi nel mantello

I moti convettivi sono **movimenti circolari di materia**, che avvengono **all'interno dei fluidi** (liquidi e aeriformi) **caldi** e attraverso i quali avviene la propagazione del calore con trasporto di materia. Quando un fluido viene riscaldato, per esempio per contatto con una fonte di calore, esso diventa meno denso, più leggero, si sposta verso l'alto, trasportando con sé calore, che poi si propaga e viene ceduto ai materiali circostanti; il fluido, quindi, si raffredda, diventa più denso, più pesante e si muove verso il basso, dove nuovamente si riscalda: si stabiliscono così, all'interno del fluido, dei movimenti circolari di materia, detti **correnti convettive**, o **moti convettivi**. I moti convettivi si possono osservare in qualsiasi fluido caldo e si ritiene che essi abbiano sede anche nel mantello, l'involucro nel cui strato superiore si trova il magma, materiale fluido e caldo.

Molti scienziati sostengono che **il movimento delle placche sia causato dai moti convettivi del magma nel mantello** (fig. 12.4): **il riscaldamento del magma avverrebbe per contatto con il nucleo**, in cui si raggiungono temperature elevate (v. alle pp. 137-138); il magma, riscaldatosi, risale verso

Che cosa sono i moti convettivi

Ipotetici moti convettivi del mantello



**Figura 12.4**  
I moti convettivi nel mantello.

la litosfera generando tensioni che ne provocano la rottura in placche e la formazione di spaccature (dorsali oceaniche e *rift* continentali), da cui il magma stesso fuoriesce. Prima di incominciare la sua discesa di nuovo verso il nucleo, il magma si sposta orizzontalmente e provoca lo spostamento delle placche che galleggiano su di esso e possono così allontanarsi (in corrispondenza di correnti ascendenti del magma), o scontrarsi (in corrispondenza di correnti discendenti del magma). Sarebbe dunque questo il meccanismo che avrebbe provocato la fratturazione della Pangea, i cui frammenti, spostati dalle correnti convettive sottostanti, vanno alla deriva e tendono a convergere e scontrarsi dove le correnti convettive ridiscendono verso il basso.

I moti convettivi che avvengono nel mantello spiegano gran parte dei fenomeni che si osservano sulla superficie terrestre. Tuttavia, una recente tecnica di indagine dell'interno della Terra, detta tomografia sismica, ha permesso di osservare che **non tutte le dorsali oceaniche si trovano in corrispondenza di correnti ascendenti del magma**: si è quindi recentemente proposta una nuova teoria, che attribuisce il movimento delle placche alla diversa velocità di rotazione degli involucri che formano la Terra (v. riquadro).

I limiti della teoria  
dei moti convettivi

### UNA RECENTE TEORIA SUL MOVIMENTO DELLE PLACCHE

Si può paragonare la Terra a una trottola in rotazione, che sta tuttavia rallentando: le cause del rallentamento possono essere individuate nelle oscillazioni dell'asse terrestre (v. a p. 68-69) e nelle maree (v. a p. 252).

Tuttavia, a causa del loro diverso peso e della diversa densità, gli involucri che formano la Terra stanno rallentando in modo diverso: la litosfera, più leggera e meno densa del sottostante mantello, rallenterebbe più velocemente rispetto a questo, mentre il mantello, più pesante e più denso, rallenterebbe più lentamente della litosfera. Dunque, la velocità di rotazione del mantello (da ovest verso est) sarebbe maggiore della velocità di rotazione della litosfera, che manifesterebbe dunque un moto relativo verso ovest: si è infatti osservato che, unendo le direzioni di movimento delle placche negli ultimi 40 milioni di anni, si nota un flusso globale in direzione est-ovest lungo cui si muovono le

placche. Esisterebbe, dunque, una sorta di scollamento tra litosfera e mantello.

Inoltre, poiché la litosfera oceanica e quella continentale hanno spessori diversi, l'attrito che si crea con il mantello sottostante sarebbe diverso nei due casi e quindi placche adiacenti si muoverebbero con velocità diverse.

Un'altra conferma a questa teoria viene dalla constatazione che la maggior parte delle subduzioni avviene verso est (cioè verso la direzione in cui il mantello ruota a una velocità maggiore della litosfera) e dall'inclinazione dei piani di subduzione: quando la subduzione avviene verso est, l'angolo del piano di subduzione ha valori compresi tra 15° e 40°, poiché la subduzione segue il movimento verso est del mantello; mentre, se avviene verso ovest, l'inclinazione può raggiungere valori di 90°, poiché in questo caso la subduzione viene frenata dal movimento verso est del mantello.

## GLOSSARIO

**Arco magmatico**

Fascia di vulcani sulla terraferma o nell'oceano, che si estende parallelamente a una fossa oceanica e si è formato per risalita in superficie di magma proveniente dalla fusione della litosfera oceanica subdotta.

**Convettivi, moti**

Movimenti circolari di materia all'interno di un fluido caldo, attraverso i quali la propagazione del calore avviene con trasporto di materia.

**Dorsale oceanica**

Rilievo del fondo oceanico, creato da eruzioni sottomarine di magma che effonde da lunghissime fratture.

**Fossa oceanica**

Profonda depressione sui fondali oceanici,

che si forma in seguito alla subduzione della litosfera oceanica.

**Orogenesi**

Complesso dei processi che concorrono alla formazione delle catene montuose.

**Placca**

Detta anche zolla, ciascuna delle porzioni in cui risulta fratturata la litosfera terrestre.

**Subduzione**

Immersione di una zolla o placca, formata da litosferica oceanica, al di sotto di una placca adiacente.

**Tettonica**

Branca della geologia che studia le deformazioni della crosta terrestre.

## TEST DI VERIFICA

**1** Quando due placche oceaniche si scontrano, quale delle due scende in subduzione?

- a la più densa;
- b la meno densa;
- c la più antica;
- d la più recente;
- e la più calda.

**2** Le dorsali oceaniche sono attraversate trasversalmente da:

- a rift;
- b canyon;
- c fosse;
- d faglie trasformi;
- e faglie trascorrenti.

**3** Le dorsali medio-oceaniche sono formate da materiale:

- a granitico;
- b basaltico;
- c sedimentario.

**4** L'orogenesi può avvenire per:

- a fuoriuscita di magma da una dorsale;
- b scontro fra placche continentali;
- c subduzione di una placca oceanica sotto a una continentale;
- d scorrimento fra due placche.

**5** Le fosse oceaniche si formano in corrispondenza di:

- a margini convergenti;
- b margini divergenti;
- c margini trascorrenti.

R

1 a; 2 d; 3 b; 4 b, c; 5 a.

# 13 Le deformazioni tettoniche della litosfera

---

Le rocce sono soggette a **forze tettoniche**, che agiscono al di sotto della crosta terrestre e che, in lunghi periodi di tempo, ne provocano la deformazione, particolarmente evidente in quelle sedimentarie.

**Il tipo e l'entità delle deformazioni** possono essere **influenzati da** alcuni fattori, tra cui la **natura delle rocce**, la **profondità** a cui si trovano e il **tempo d'azione** delle forze tettoniche. In risposta a queste forze, le rocce possono manifestare un **comportamento rigido** e subire fratture, dando origine alle **faglie**, oppure **plastico** e subire deformazioni, formando delle **pieghe**. Su **scala regionale**, le forze tettoniche possono formare strutture, dette **falde di ricoprimento**.

## 13.1 Le strutture tettoniche

I movimenti tettonici Su gran parte della superficie terrestre gli affioramenti rocciosi non conservano la loro disposizione originaria, poiché sono stati sottoposti a **lenti e forti movimenti di origine endogena**, detti **movimenti tettonici**, che li deformano fortemente, fratturandoli, dislocandoli e ripiegandoli. Tali deformazioni sono osservabili in tutte le rocce, siano esse ignee, metamorfiche o sedimentarie; tuttavia, in queste ultime sono più evidenti a causa della loro stratificazione, che rende più evidente il risultato dei fenomeni avvenuti.

Le deformazioni delle rocce sottoposte a moti tettonici: faglie e pieghe

Per comprendere le deformazioni tettoniche, è fondamentale esaminare il comportamento che le rocce manifestano se vengono sottoposte a sollecitazioni tettoniche. In base a questo criterio, le rocce possono essere distinte in due categorie: rocce a **comportamento rigido** e rocce a **comportamento plastico** (va tenuto presente, però, che una stessa roccia può manifestare entrambi i comportamenti, a seconda delle condizioni ambientali in cui viene a trovarsi).

I due tipi di deformazione delle rocce sono le faglie e le pieghe. Se sottoposte a sollecitazioni progressivamente crescenti, le rocce a comportamento rigido si rompono, si fratturano quando le forze raggiungono una determinata intensità, senza subire alcuna modificazione plastica e danno origine alle **faglie** (v. par. 13.2). Quelle a comportamento plastico, invece, si deformano plasticamente e formano le **pieghe** (v. par. 13.3); anch'esse, però, possono fratturarsi lun-

go le zone di massima tensione o di stress differenziale. L'entità e il tipo delle deformazioni dipendono da alcuni fattori; fra questi, la natura delle rocce, la profondità a cui esse si trovano e il tempo d'azione delle forze tettoniche.

Le rocce ignee, come pure quelle **sedimentarie (calcaree e dolomitiche) non stratificate**, si comportano come masse rigide che, sottoposte a sollecitazioni tettoniche, non si lasciano modellare; esse resistono sino a un certo valore-soglia, poi si fratturano. Al contrario, le rocce **sedimentarie stratificate** si comportano come masse plastiche, materiali pastosi che reagiscono alle diverse spinte ripiegandosi variamente, senza perdere il parallelismo degli strati, soprattutto se fra uno strato e l'altro si interpongono veli di materiali che svolgono una funzione lubrificante, come nel caso delle argille o della grafite.

Il caso delle rocce sedimentarie

All'aumentare della profondità a cui si trova una roccia, aumentano anche la pressione e la temperatura a cui essa è sottoposta e questi fattori, come si è potuto stabilire in laboratorio, accentuano il comportamento plastico della roccia: da ciò deriva che rocce rigide in superficie possono diventare plastiche in profondità. Anche il tempo d'azione delle forze tettoniche può influenzare il comportamento rigido o plastico di rocce della medesima natura; si è potuto constatare che le **fratture** sono prodotte soprattutto da forze di breve durata, ma molto intense, mentre i **ripiegamenti** sono il risultato di deboli forze che hanno agito per lunghissimo tempo, migliaia o milioni di anni.

Come agiscono la profondità e il tempo

## 13.2 Le faglie

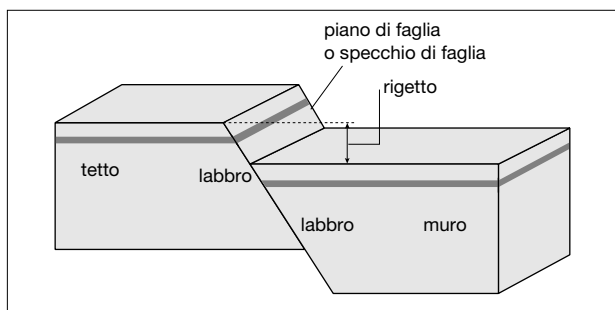
Gli affioramenti rocciosi sono in genere attraversati da fratture, più o meno fitte e regolari, dette **diaciasi** (dal greco *diáklasis*, frattura), in cui **non si osservano sensibili spostamenti** delle parti da esse separate.

Diaciasi

Di maggiore interesse per un geologo sono, invece, le **faglie**, cioè le fratture che possono prodursi in una massa rocciosa, accompagnate da spostamento dei due blocchi (o di uno solo di essi), che prendono il nome di **labbri**, lungo il **piano di rottura**, chiamato **piano di faglia** e detto anche **specchio di faglia**, se direttamente osservabile in un affioramento roccioso; lo specchio di faglia presenta spesso striature, il cui andamento permette di risalire alla direzione dello spostamento subito dai labbri della faglia. **Il piano di faglia può essere verticale, ma più frequentemente è inclinato**: in questo caso, si può distinguere un labbro che si trova sopra il piano di faglia, chiamato **tetto**, e uno che si tro-

Labbri e piani, o specchi, di faglia





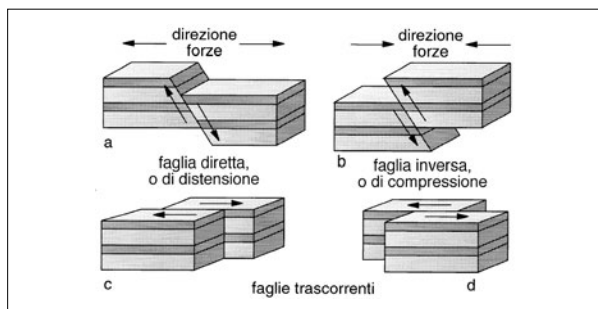
**Figura 13.1**  
Parametri tipici  
di una faglia.

va sotto il piano di faglia, detto **muro**. Si chiama rigetto l'entità dello spostamento subito dai labbri (fig. 13.1), misurato dalla distanza verticale fra il tetto e il letto.

Nelle faglie si possono individuare due dimensioni: la **lunghezza**, osservabile sulla superficie terrestre, e la **profondità**, non direttamente osservabile. Entrambe queste grandezze possono avere valori assai variabili, che dipendono, oltre che dalla natura delle rocce, anche dall'entità delle forze che hanno agito su di esse: la lunghezza può andare da alcuni decimetri a centinaia di chilometri, la profondità massima è assai minore e nei casi più imponenti non supera il centinaio di chilometri (poiché all'aumentare della profondità, e con essa anche della temperatura, le rocce tendono a deformarsi plasticamente, senza rompersi).

### ■ I tipi di faglia

In base alla direzione del movimento che si è verificato, le faglie vengono classificate in verticali, distinte in **faglie dirette** e **faglie inverse**, e in orizzontali, dette anche **faglie trascorrenti**.



**Figura 13.2**  
Diversi tipi di faglia.

Le **faglie dirette** sono anche dette **faglie di distensione**, perché si originano quando le masse rocciose vengono sollecitate da sforzi tettonici orizzontali di distensione, che spingono i due labbri in direzioni opposte; perciò, in esse, il tetto si trova più in basso del letto (fig. 13.2 a).

Faglie dirette

Le **faglie inverse** sono anche dette **faglie di compressione**, perché si originano quando le masse rocciose vengono sollecitate da sforzi tettonici orizzontali di compressione; in questo caso, il tetto viene spinto più in alto del letto (fig. 13.2 b); faglie inverse si possono, per esempio, osservare in corrispondenza di zone di subduzione e hanno un movimento che porta il blocco fagliato a occupare uno spazio più ristretto rispetto all'originale. I **piani** delle faglie dirette sono generalmente quasi verticali, mentre quelli delle faglie inverse sono poco inclinati (capita anche che essi siano quasi orizzontali e, in tal caso, i due blocchi rocciosi si comportano come due fogli di carta spinti uno sull'altro: si verificano così dei **sovrascorrimenti**, strutture tipiche dei margini convergenti di placca nelle quali uno dei due scivola sopra l'altro, ricoprendolo).

Faglie inverse

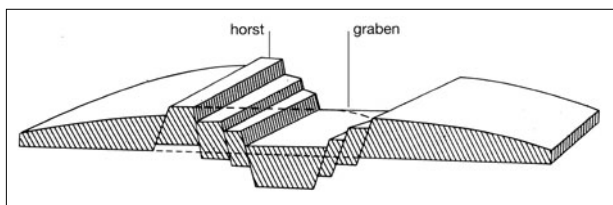
Le **faglie trascorrenti** sono generate da un movimento prevalentemente orizzontale e il piano di faglia risulta quasi verticale (fig. 13.2 c, d). Rispetto a un osservatore che si ponga di fronte al piano di faglia, il blocco situato al di là del piano potrà apparire spostato verso destra (faglia trascorrente destra) o verso sinistra (faglia trascorrente sinistra). La più nota faglia trascorrente è la faglia di San Andreas, in California (v. a p. 154). Il sistema più esteso di faglie trascorrenti è quello che taglia perpendicolarmente le dorsali oceaniche: le faglie che lo costituiscono vengono più propriamente chiamate **faglie trasformi** e si distinguono dalle faglie trascorrenti propriamente dette perché scorrono in direzioni opposte solo nel tratto compreso fra i due tronconi della dorsale.

Faglie trascorrenti

Una faglia è una struttura che si sviluppa durante intervalli di tempo molto lunghi e, a un certo punto, la sua attività cessa: in questo caso viene detta **faglia fossile**. Tuttavia, essa può rimettersi in movimento e viene chiamata **faglia rivivisciente**. Quando la faglia rive, può comportarsi in modi diversi, cioè può manifestarsi, per esempio, come faglia inversa, continuare come faglia diretta e finire come faglia trascorrente. Le faglie intervengono a determinare e condizionare due importanti fenomeni endogeni del nostro pianeta: la **sismicità** e il **vulcanismo**.

Faglie trasformi

Generalmente, una faglia non è isolata, ma fa parte di sistemi più vasti di faglie, tra cui ricordiamo le associazioni di faglie dirette, che interessano aree molto vaste e possono es-

**Figura 13.3**

Esempio di associazione di faglie.

sere lunghe fino a migliaia di chilometri. Esempio di associazione di faglie dirette sono le fosse tettoniche, o *rift valley* continentali: in esse si riconoscono (fig. 13.3) i **graben** (in tedesco, trincea), depressioni, generalmente lunghe e strette, presenti al centro della fossa tettonica, delimitate ai lati da parti rilevate dette pilastri, o, con altro termine tedesco, **horst**. Questa situazione è osservabile, per esempio, lungo la Valle del Reno e anche lungo la *Great Rift Valley* in Africa Orientale (v. a p. 152).

### 13.3 Le pieghe

Le forze di compressione che agiscono lentamente su materiali rocciosi a comportamento plastico producono deformazioni dette **pieghe**.

Una piega ha lo stesso aspetto di un mazzo di fogli piegati: se curviamo una risma di carta, ciascun foglio si flette e scivola leggermente sull'altro, ma conserva il suo spessore originale. Si può verificare facilmente che, mentre un singolo foglio di carta può essere piegato senza fatica con un raggio di curvatura strettissimo, se il numero e lo spessore dei fogli aumenta, per piegarli occorre una quantità di energia molto maggiore, tanto che una risma di carta può essere appena curvata. In natura questo comportamento è tipico di materiali flessibili, in cui gli strati rocciosi scivolano uno sull'altro.

Il tipo più semplice di piega è detto **flessura**, cioè un raccordo inclinato che collega tra loro due aree con strati orizzontali posti a livello diverso; se tale raccordo diventa quasi verticale, si forma invece una **piega a ginocchio**.

Nelle pieghe più accentuate si distinguono due **fianchi** inclinati, che racchiudono una parte detta nucleo. L'area della piega in cui la superficie della piega ha la massima curvatura e si raccordano i due fianchi prende il nome di **cerniera**; si dice **piano assiale** il piano ideale che passa per la cerniera della piega (fig. 13.4).

Frequenti sono le associazioni di pieghe **anticlinali**, con la concavità rivolta verso il basso, e di **sinclinali**, con la conca-

Flessura  
e piega a ginocchio

Struttura della piega

Anticlinali e sinclinali

vità rivolta verso l'alto. Tuttavia, il criterio ora esposto non è sempre sufficiente per stabilire se una piega è un'anticlinale o una sinclinale, poiché possono sovrapporsi gli effetti di più forze; per distinguerle, si preferisce dunque far riferimento all'età degli strati osservabili in una piega, tenendo presente che, prima del piegamento, gli strati più antichi si trovavano alla base della successione di strati: in un'anticlinale, gli strati più antichi si trovano nel nucleo, mentre nel nucleo di una sinclinale si osservano gli strati più recenti. In base all'inclinazione del piano assiale, che a sua volta dipende dall'intensità delle forze di compressione che hanno agito sui due lati della piega, le pieghe possono essere classificate in:

- **pieghe diritte**, in cui le forze di compressione hanno agito con la stessa intensità ai due lati e il piano assiale è verticale;
- **pieghe inclinate e rovesciate**, in cui ha prevalso la forza di compressione su uno dei due lati e il piano assiale è inclinato rispetto alla verticale, dalla parte opposta rispetto a quella in cui ha agito la forza di intensità maggiore;
- **pieghe coricate**, in cui il piano assiale è prossimo all'orizzontale per la notevole differenza tra l'intensità delle forze di compressione che hanno agito sui due lati; in questo caso, lungo il piano che collega l'anticlinale, sovrastante, con la sinclinale, si può originare una faglia e si formano così strutture dette piega-faglia.

Le pieghe diritte sono più rare; sono invece più comuni le pieghe inclinate e rovesciate.

Pieghe diritte

Pieghe inclinate e rovesciate

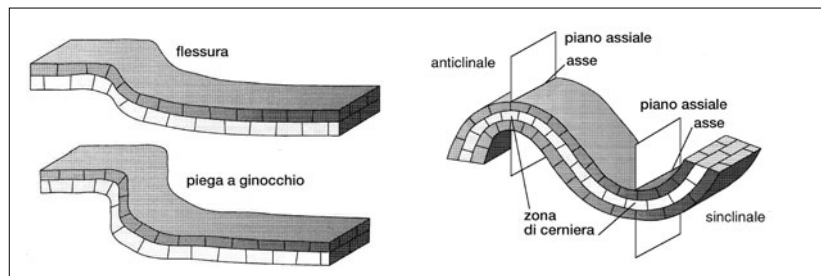
Pieghe coricate

### 13.4 Strutture tettoniche a scala locale e a scala regionale

In base all'estensione dell'area interessata dalle forze agenti sulle rocce, possiamo distinguere le strutture tettoniche a scala locale da quelle a scala regionale.

**Figura 13.4**

*Tipi di pieghe tettoniche.*



## GLOSSARIO

**Anticlinale**

Piega con concavità rivolta verso il basso, nel cui nucleo si trovano i termini più antichi delle serie di strati rocciosi che hanno subito il piegamento.

**Diaclasi**

Fratture presenti nelle rocce, senza relativo spostamento delle parti da esse separate.

**Faglia**

Frattura di una massa rocciosa, accompagnata dallo spostamento reciproco delle due parti lungo una superficie detta piano di faglia.

**Graben**

Depressione, generalmente lunga e stretta, presente al centro di una fossa tettonica, delimitata ai lati da parti rilevate.

**Horst**

Parte rilevata, detta anche pilastro, che delimita i lati di una fossa tettonica.

**Piega**

Flessione di strati di rocce a comportamento plastico, dovuta all'azione deformante di forze tettoniche.

**Rigetto**

Entità dello spostamento subito da un labbro di una faglia rispetto all'altro.

**Sinclinale**

Piega con concavità rivolta verso l'alto, nel cui nucleo si trovano i termini più recenti delle serie di strati rocciosi che hanno subito il piegamento.

**Sollecitazioni tettoniche**

Spinte e tensioni che si producono nelle rocce e ne determinano deformazioni plastiche o fragili.

**Strato**

Massa rocciosa di spessore variabile, limitata superiormente e inferiormente da superfici pressoché parallele.

Strutture a scala locale

Fra le **strutture tettoniche a scala locale** sono comprese le cosiddette pieghe-faglie, descritte nel precedente paragrafo, e le scaglie tettoniche, cioè una serie di faglie inverse presenti in rocce piegate.

Strutture a scala regionale

Fra le **strutture a scala regionale** ricordiamo, invece, le **falde di ricoprimento**: si tratta di pieghe rovesciate, che interessano aree molto estese (diverse centinaia di chilometri). Queste strutture possono originarsi per sovrascorrimento delle rocce, che formano il tetto di una faglia inversa molto estesa al di sopra delle masse rocciose costituenti il letto della faglia stessa. La loro presenza è segnalata dalla sovrapposizione di strati: lo strato superiore, formato dalle rocce che sono sovrascorse, è detto **alloctono** (dal greco *állos*, diverso, e *chthón*, terra); lo strato inferiore, formato dalle rocce rimaste sul luogo d'origine, è detto **autoctono** (dal greco *autós*, se stesso, e *chthón*, terra). Particolari tipi di ricoprimenti sono le **falde di compressione**, così chiamate perché si originano in seguito a forze di compressione che agiscono su scala regionale. Questo tipo di struttura tettonica è tipico delle grandi catene montuose, per esempio, della catena himalaiana e di quella alpina; in esse si riconoscono una radice, la parte più retrostante del ricoprimento, e un fronte, che corrisponde alla parte più avanzata. L'erosione dello strato alloctono può portare alla formazione di un'incisione

ne, che prende il nome di **finestra tettonica**, attraverso la quale è messo a nudo il sottostante strato autoctono. Se poi l'erosione isola una parte della falda di ricoprimento dal resto, si formano strutture a cui si dà il nome di **klippen** (termine tedesco che significa scoglio).

## TEST DI VERIFICA

**1** In una zona di compressione costituita da rocce plastiche si forma:

- a una piega;
- b una falda;
- c una faglia inversa;
- d una faglia trascorrente.

**2** La faglia di San Andreas è:

- a diretta;
- b inversa;
- c trascorrente;
- d trasforme.

**3** Se il tetto di una faglia scivola più in basso del letto, la faglia si dice:

- a inversa;
- b diretta;
- c trasforme;
- d trascorrente.

**4** Le dorsali oceaniche sono tagliate perpendicolarmente da:

- a faglie inverse;
- b faglie trasformi;
- c faglie trascorrenti;
- d faglie dirette.

**5** Le falde di compressione sono:

- a strutture a scala locale;
- b strutture a scala regionale.

**R**

1 a; 2 c; 3 b; 4 a; 5 b.

# 14 Il vulcanismo

---

*Il calore interno della Terra e il materiale fluido, o **magma**, in essa contenuto si trasferiscono sulla superficie terrestre, dando luogo a diverse manifestazioni che nel loro insieme prendono il nome di **vulcanismo**, distinto in **primario** e **secondario**.*

*Del **vulcanismo primario** fanno parte le **eruzioni**, emissioni di magma che, a seconda della composizione e della viscosità di questo, possono essere di tipo **esplosivo** o **effusivo** e che, a loro volta, danno origine a **diversi tipi di vulcani**. I vulcani sono rilievi della superficie terrestre, generalmente di forma conica, in cui si riconoscono diverse parti: una **camera magmatica**, un **camino** e un **cratere**, da cui il magma fuoriesce come **lava fluida**; durante le eruzioni, insieme alla lava sono emessi anche **materiali gassosi e solidi**.*

*Il **vulcanismo secondario** consiste, invece, in emissioni di **gas o vapori** e di **acque calde** e caratterizza in genere le fasi finali dell'attività di un vulcano. Il vulcanismo si manifesta più intensamente in particolari **zone instabili** della crosta terrestre, che corrispondono ai margini delle placche.*

## 14.1 L'attività vulcanica

Il **vulcanismo**, cioè l'insieme delle numerose manifestazioni dell'attività vulcanica, **rappresenta il modo in cui la Terra trasferisce all'esterno il calore e il materiale fluido, o magma, in essa presenti**. Questo fenomeno non è tipico solo del nostro pianeta, ma si è osservato anche su altri pianeti e su satelliti del sistema solare (per esempio, su Marte si trova il vulcano più grande del sistema solare, il Mons Olympus, testimone, insieme a molti altri vulcani, della passata attività vulcanica del pianeta rosso; Io, satellite di Giove, è tuttora interessato da un'intensa attività vulcanica).

Il manifestarsi dell'attività vulcanica sulla superficie terrestre è legato alle **condizioni di temperatura e di pressione litostatica** (cioè dovuta al peso delle rocce soprastanti) **nelle parti più profonde della crosta e del mantello superiore**. In tali regioni, infatti, proprio per l'alta temperatura, parte del materiale presente è fuso o vicino al punto di fusione e, per la sua minore densità nei confronti del materiale circostante, tende a spostarsi verso l'alto. Se, come **conseguenza** dei movimenti della litosfera e **della formazione** in essa **di fratture**, la pressione litostatica in qualche punto diminuisce, il **materiale fuso può risalire fino in superficie e dar luogo a fenomeni vulcanici**.

Un fenomeno  
non solo terrestre

Le cause dell'attività  
vulcanica

I fenomeni vulcanici non si esauriscono, però, con l'emissione di magma (**eruzione**) da parte dei vulcani, che rappresenta il cosiddetto **vulcanismo primario**, ma comprendono anche emissioni di gas o vapori e di acque calde, che nel loro insieme costituiscono il **vulcanismo secondario** (che, in genere, caratterizza le fasi finali dell'attività di un vulcano).

Vulcanismo primario  
e vulcanismo  
secondario

## 14.2 La struttura di un vulcano

Un **vulcano** può essere schematicamente definito come una frattura nella crosta terrestre da cui fuoriesce il magma. La parte esterna (la sola normalmente visibile) viene comunemente indicata con il nome di **monte vulcanico**, o edificio vulcanico. In realtà, il vulcano risulta formato da una **camera magmatica**, detta anche **bacino o serbatoio magmatico**, situata in genere a qualche chilometro di profondità e in cui è presente il magma proveniente dagli strati più profondi della crosta terrestre o dal mantello, e da un **condotto vulcanico**, detto anche camino vulcanico, attraverso il quale il magma risale verso la superficie e che termina con il **cratere**, un'apertura dalla quale fuoriesce il magma (fig. 14.1). I vulcani, che possono essere subaerei, se si trovano sui continenti, o sottomarini, se si trovano sui fondali marini (v. riquadro a p. 174), in base alla collocazione del condotto vulcanico possono essere classificati in vulcani centrali e vulcani lineari.

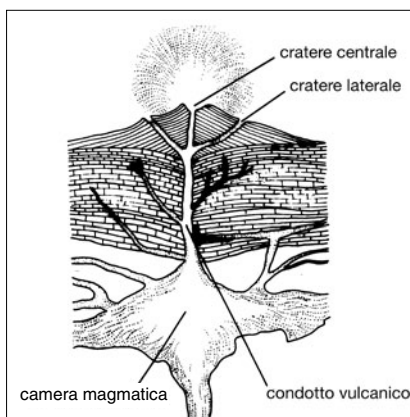
I **vulcani centrali** sono alimentati da un condotto vulcanico di forma pressappoco cilindrica, che culmina in un cratere centrale, dotato eventualmente di ramificazioni che terminano con **crateri laterali**. A seconda delle modalità delle eru-

Il monte vulcanico

La camera  
magmatica

Il condotto vulcanico  
e il cratere

Vulcani centrali



**Figura 14.1**  
*Le parti di un vulcano.*



## Vulcani lineari

zioni, che a loro volta dipendono dalla composizione del magma, possono formarsi edifici vulcanici morfologicamente diversi (v. par. 14.5).

**I vulcani lineari sono provvisti di una serie di condotti allineati lungo una frattura della crosta terrestre:** le spaccature penetrano profondamente nell'interno della Terra e permettono la risalita del magma. Ne sono un esempio i vulcani di tipo islandese, in cui **manca un vero e proprio monte vulcanico**, poiché i vulcani emettono contemporaneamente più colate laviche che formano un unico espandimento: la lava, molto fluida, fuoriesce da fessure lunghe e strette, si espande su vaste superfici e forma strutture tabulari, dette *plateaux* basaltici (come quelli che si possono osservare in India, nella regione del Dekkan o in Sud America, attorno al Rio Paranà).

### ■ Le depressioni vulcaniche

Gli edifici vulcanici possono essere coinvolti in eruzioni tanto violente da provocare il crollo delle pareti del cratere e formare così delle depressioni vulcaniche, dette caldere e diatremi.

## Le caldere

**Le caldere sono depressioni con pareti ripide e fondo piatto, che si formano in seguito al crollo, improvviso o graduale, della parte sommitale del monte vulcanico** dovuto allo svuotamento quasi completo del serbatoio magmatico in seguito a un'eruzione; se successivamente, in seguito al-

## ATTIVITÀ VULCANICA SOTTOMARINA

Data la grande estensione delle dorsali oceaniche (v. cap. 12), l'attività vulcanica sottomarina è molto intensa: infatti, il sistema di dorsali oceaniche è costituito da una successione di vulcani sottomarini e i fondali stessi sono formati da lava, ricoperta spesso da una coltre più o meno consistente di sedimenti.

L'attività vulcanica sottomarina si svolge con caratteristiche diverse a seconda della profondità a cui si verificano le eruzioni: se le bocche eruttive si trovano su fondali poco profondi, i materiali emessi possono uscire dall'acqua ed essere lanciati al di sopra del livello del mare; quando lo spessore dell'acqua è superiore a 200-300 m i materiali non raggiungono la superficie; a migliaia di metri di profondità l'attività esplo-

siva non si manifesta, perché i gas presenti nel magma non sono in grado di liberarsi a causa della pressione elevata dovuta alla colonna d'acqua sovrastante.

Talvolta, le eruzioni sottomarine sono tanto imponenti e prolungate nel tempo da provocare la formazione di edifici vulcanici che emergono dall'acqua e formano dunque delle isole, come successe, per esempio, nel 1963, quando, nell'oceano Atlantico, a circa 30 km dalle coste islandesi, emerse l'isola vulcanica di Surtsey. Nelle effusioni sottomarine, la lava non scorre per lunghi tratti e si raffredda molto velocemente vicino al luogo in cui è stata emessa, formando strutture globose e arrotondate alle quali si dà il nome di **lave a cuscino**, o *pillow lave*.

la ripresa dell'attività vulcanica, si forma all'interno della caldera un nuovo edificio vulcanico, l'intera struttura è detta **vulcano a recinto** (come, per esempio, il Vesuvio, in cui l'attuale cono vulcanico si trova all'interno di una caldera formata per il crollo del vecchio Monte Somma, durante la disastrosa eruzione del 79 d.C. che distrusse Ercolano e Pompei). Le caldere possono essere occupate da laghi, che per tale motivo si dicono di origine vulcanica (fra questi ricordiamo i laghi di Vico e di Bracciano, nel Lazio).

Vulcano a recinto

**I diatremi sono depressioni vulcaniche a forma d'imbuto, riempite di breccia**, roccia formata dalla cementazione di materiali provenienti dalla camera magmatica che, durante eruzioni di tipo esplosivo, i gas vulcanici hanno strappato dalla crosta profonda e trasportato, depositandoli, nel condotto vulcanico (esempi di diatremi sono gli "imbuto", o cammini diamantiferi, di Kimberley, in Sudafrica).

I diatremi

### 14.3 I materiali emessi da un vulcano

Durante un'eruzione, un vulcano può emettere materiali liquidi, solidi e aeriformi.

**I materiali liquidi** sono costituiti dal **magma**, termine con il quale ci si riferisce più propriamente al materiale fuso presente all'interno della crosta, mentre, quando tale materiale fuoriesce in superficie e perde i gas che conteneva, si parla di **lava**. I magmi sono miscele di diversi ossidi, tra i quali predomina la silice,  $\text{SiO}_2$ , e di vari gas: il diverso contenuto in silice dei magmi (v. cap. 8) determina il tipo di eruzione a cui essi possono dar luogo (v. par. 14.5). Le lave solidificate possono assumere aspetti diversi (v. riquadro a p. 170).

Materiali liquidi:  
magma o lava

**I materiali solidi**, chiamati anche materiali **piroclastici** (dal greco *pyr*, fuoco e *klastos*, spezzato), in base alla loro dimensione vengono distinti in ceneri (diametro inferiore a 2 mm), lapilli (diametro compreso tra 2 e 6 mm) e bombe vulcaniche (diametro superiore a 6 mm). Questi materiali, strappati dalle pareti del condotto vulcanico, vengono lanciati in aria durante le eruzioni e ricadono a diverse distanze dal cratere: le polveri possono essere trasportate dai venti anche a diversi chilometri di distanza, mentre i lapilli e le bombe vulcaniche ricadono più vicini al vulcano; i materiali piroclastici ricaduti al suolo possono cementarsi e formare le **rocce piroclastiche** (v. a p. 119).

Materiali solidi,  
o piroclastici

I materiali piroclastici più fini possono formare delle miscele con i gas e con l'acqua e originare, rispettivamente, nubi ardenti e lahar.

## I TIPI DI LAVA

Dopo essere fuoriuscite dai vulcani, le colate laviche solidificano, assumendo aspetti diversi che dipendono sia dalle modalità con cui avviene il raffreddamento, sia dalla natura delle lave. In base al loro aspetto, le lave possono essere classificate in diversi gruppi, tra cui lave a cuscino, lave *pahoehoe* e lave *aa*.

**Lave a cuscino.** Sono così chiamate perché assumono l'aspetto di blocchi arrotondati e sono anche note con il nome inglese di *pillow lava*; si formano solo in ambiente sottomarino, in corrispondenza delle dorsali oceaniche, quando la lava, appena fuoriuscita, scivola lungo superfici inclinate: la superficie si raffredda rapidamente, per contatto con l'acqua, e assume un aspetto vetroso, mentre l'interno si raffredda più lentamente.

**Lave pahoehoe.** Il nome deriva da un termine hawaiano, che significa "dove si può

camminare a piedi nudi". Si tratta, infatti, di lave derivate da magmi molto fluidi, la cui superficie è liscia, ondulata e ricoperta da un sottile strato di vetro vulcanico; talvolta sono anche dette lave a corda, perché il loro aspetto richiama quello di una corda. Questo aspetto particolare è dovuto al fatto che la lava, molto fluida, solidifica prima in superficie, mentre al di sotto essa continua a scorrere velocemente, favorendo la formazione di ondulazioni in superficie.

**Lave aa.** In hawaiano il nome significa "su cui non si può camminare a piedi nudi"; si tratta di lave la cui superficie è irregolare; i magmi da cui derivano sono più viscosi dei precedenti; durante il raffreddamento della lava, si forma una rigida crosta superficiale, che si frattura e si rompe in blocchi (perciò sono dette anche lave a blocchi), a causa del movimento della lava sottostante, ancora fluida.

### Nubi ardenti

Le **nubi ardenti** sono **enormi nubi di materiale incandescente**, formate da miscele di gas, ceneri e polveri calde, che si spostano a grande velocità (anche 100 km/h) lungo i fianchi dei vulcani, con temperature di circa 800 °C e manifestano un elevato potere distruttivo. I materiali piroclastici contenuti nelle nubi ardenti possono depositarsi e formare rocce dette ignimbriti.

### Lahar

I **lahar** sono, invece, **colate di fango**, che si formano in seguito a eruzioni con **abbondante materiale piroclastico**, **quando questo si mischia all'acqua** (perché sul suo percorso incontra un ghiacciaio, oppure perché l'eruzione avviene mentre piove).

### Materiali aeriformi

I **materiali aeriformi** includono diverse sostanze contenute nel magma, che, per diminuzione della pressione, si liberano al momento dell'eruzione: tra esse citiamo il vapore acqueo (il più abbondante), il diossido di carbonio (o anidride carbonica), il monossido di carbonio, l'idrogeno, il diossido di zolfo (o anidride solforosa), il triossido di zolfo (o anidride solforica), il cloro, l'azoto e vari gas rari. Gli scienziati sono concordi nel riconoscere che le emissioni gassose dei vulcani hanno avuto un ruolo fondamentale nella formazione e nell'evoluzione dell'atmosfera terrestre (v. cap. 17); del resto, anche oggi esse sono causa di variazioni climatiche sul nostro pianeta.

## 14.4 Le fasi di un'eruzione

Le **eruzioni**, cioè le **emissioni di magma a intervalli di tempo più o meno regolari**, sono la manifestazione più spettacolare dell'attività vulcanica.

Si dicono **attivi i vulcani attualmente in eruzione**, o che lo sono stati in tempi recenti. Sono **vulcani quiescenti quelli che non eruttano da un tempo sufficientemente lungo**, tanto da essere ritenuti innocui, ma che danno segni di attività attraverso emissioni gassose. Si dicono **vulcani spenti quelli che, da diversi secoli, non danno segni di attività** (anche limitata alle sole emissioni gassose), poiché la loro camera magmatica non è più stata alimentata. Tuttavia, non è sempre facile distinguere tra vulcani quiescenti e spenti, poiché si sono verificati casi di vulcani ritenuti spenti che hanno improvvisamente ripreso la loro attività, come, per esempio, il vulcano La Soufriere, sull'isola caraibica di Montserrat, rientrato in attività il 25 giugno 1997 dopo quasi quattro secoli.

**Un'eruzione vulcanica è preceduta da una fase di premonizione**, durante la quale il vulcano "annuncia" la ripresa dell'attività mediante segni premonitori, quali terremoti di bassa intensità e variazioni di livello del suolo. **L'eruzione vera e propria può essere di tipo effusivo o di tipo esplosivo**, in base alla composizione chimica del magma, alla sua temperatura e alla quantità di gas in esso disciolti: tutti questi fattori influenzano la viscosità (l'attrito fra le diverse molecole di un liquido o di un gas) e dunque la mobilità del magma.

Si ha un'**eruzione di tipo effusivo** quando il magma, povero di silice, si presenta abbastanza fluido e può risalire facilmente nel condotto vulcanico verso la superficie; i gas in esso dispersi si separano gradualmente, favorendo una tranquilla eruzione di tipo effusivo; la lava trabocca dal cratere e scorre in colata sui pendii del vulcano, allontanandosi rapidamente.

Si ha un'**eruzione di tipo esplosivo** quando il magma, ricco di silice, è molto viscoso e risale con maggior difficoltà verso la superficie; i gas in esso contenuti si liberano violentemente, superando in modo esplosivo la resistenza del materiale sovrastante: i gas strappano dalla parte alta del condotto roccia sbriciolata e lava polverizzata in goccioline, che vengono poi lanciate in aria. Talvolta, il magma è tanto viscoso da non riuscire a traboccare dal cratere, ma si solidifica al suo interno, formando una sorta di "tappo" di materiale solido che, prima o poi, la pressione esercitata dai gas farà saltare.

Al termine della fase di più intensa attività eruttiva subentra una **fase di emanazione**, che consiste nella fuoriuscita dal

Vulcani attivi, quiescenti e spenti

Eruzione di tipo effusivo

Eruzione di tipo esplosivo

Fase di emanazione

cratere di vapori e gas caldi; a questa segue una fase di riposo o quiescenza, durante la quale si ha un'estinzione dell'attività, spesso solo apparente.

## 14.5 I tipi di vulcano

In base alle caratteristiche delle loro eruzioni, i **vulcani sono classificati in quattro tipi principali**: hawaiano, stromboliano, vulcaniano e peleano (tab. 14.1). Questa classificazione, proposta dal geologo francese A. Lacroix (1867-1948), pone a un estremo i vulcani che si caratterizzano per eruzioni di tipo effusivo (vulcani di tipo hawaiano) e all'altro quelli le cui eruzioni sono di tipo esplosivo (vulcani di tipo peleano); altri tipi di vulcani presentano eruzioni con caratteristiche intermedie, che, tuttavia, non sempre si prestano a una classificazione netta.

### ■ Vulcani di tipo hawaiano

Rappresentanti di questo tipo sono i vulcani delle isole Hawaii, **caratterizzati da tranquille effusioni di lave, senza forti scosse o esplosioni**. Fuoriuscendo dai condotti, le lave, molto fluide, sono in grado di scorrere per chilometri in larghe colate, anche di modesto spessore, sui fianchi dei vulcani, che risultano perciò molto estesi, arrotondati e con versanti poco inclinati, tanto da essere chiamati **vulcani a scudo**, per le grandi dimensioni della loro base. I gas contenuti nella lava vengono liberati in modo tranquillo, prima che es-

Vulcani a scudo

**Tabella 14.1** I tipi di vulcano

TIPO	CARATTERISTICHE	ESEMPI
<b>hawaiano</b>	eruzione tranquilla, con lave fluidissime che traboccano senza esplosione e si espandono formando un edificio vulcanico basso e piatto (vulcano a scudo)	Mauna Kea, Kilauea (isole Hawaii); Erebus (Antartide)
<b>stromboliano</b>	il magma lavico, discretamente fluido, ribolle nel cratere con esplosioni frequenti e lancio di materiale (bombe, lapilli, scorie)	Stromboli (Italia)
<b>vulcaniano</b>	il magma è molto viscoso e tende a ostruire il condotto vulcanico, che, per la tensione dei gas, si squarcia con violente esplosioni; colate in genere poco frequenti e poco estese	Vulcano, Vesuvio (Italia)
<b>peleano</b>	il magma è tanto viscoso che si consolida nel condotto; la pressione dei gas e la forza esercitata dal magma sottostante talvolta spingono fuori lentamente la lava; formazione di nubi ardenti	La Pelée (Martinica, Piccole Antille)

sa solidifichi e si fermi, per cui la superficie della colata lavica si presenta liscia, ricoperta da un sottile strato di vetro vulcanico e prende il nome di *pahoehoe* (termine che in hawaiano significa “dove si può camminare a piedi nudi”).

Il “pahoehoe”

### ■ Vulcani di tipo stromboliano

Così chiamati dal vulcano Stromboli, nelle isole Eolie, emettono magma discretamente fluido, che cristallizza in parte durante la risalita nei condotti, e l'attività vulcanica si riduce al lancio di frammenti di lava semiconsolidati, detti proietti vulcanici. Le eruzioni di tipo stromboliano sono moderatamente e regolarmente esplosive e il “tappo” di lava solidificata che si può formare all'interno del condotto vulcanico viene continuamente rimosso senza grosse deflagrazioni; esse si contraddistinguono, inoltre, per l'alternanza irregolare, anche in una stessa eruzione, di effusioni laviche e di lancio di proietti, che origina edifici vulcanici, chiamati **strato-vulcani**, caratterizzati appunto dalla stratificazione di colate laviche solidificate e materiali piroclastici.

Eruzioni moderatamente esplosive

Strato-vulcani

### ■ Vulcani di tipo vulcaniano

Il nome deriva dall'isola di Vulcano, nelle Eolie. Questi vulcani producono **eruzioni esplosive molto violente**, che possono arrivare a distruggere lo stesso cono da cui si sviluppano. Le emissioni sono costituite da lave molto viscosi, ricche di grandi quantità di gas. Nei periodi di quiescenza fra un'eruzione e l'altra, la lava solidifica, formando una specie di “tappo” che ostruisce il condotto: ciò porta a un aumento della pressione dei gas e a violente esplosioni durante l'eruzione successiva, con emissione di scorie solide derivanti dalla rottura del “tappo” di lava; inoltre, si originano enormi nubi a forma di fungo, ricche di ceneri.

Eruzioni esplosive molto violente

### ■ Vulcani di tipo peleano

Il nome deriva dal vulcano Pelée, in Martinica, protagonista di una violentissima eruzione nel 1902. Nei vulcani peleani, l'eruzione vera e propria, **di tipo esplosivo, avviene in senso orizzontale**, al di sotto di un “tappo” formatosi per solidificazione, nel condotto vulcanico, di un magma molto acido e dunque estremamente viscoso. Talvolta il magma è così viscoso che forma all'interno del condotto una sorta di “spina” solida, che viene lentamente spinta fuori e origina delle protrusioni solide che possono emergere dal cratere per parecchi metri.

Eruzioni esplosive in senso orizzontale

Estrusione del magma

Nel 1902 il condotto del vulcano Pelée era ostruito da un grande tappo di lava solidificata, che fu estruso sotto forma

di un'alta colonna di roccia, dalla cui base uscì una nube ardente, che rotolò lungo i versanti del vulcano e rase al suolo la città di St. Pierre.

## 14.6 Il vulcanismo secondario

L'attività vulcanica è in genere accompagnata o seguita, nella fase di quiescenza, da numerosi fenomeni, che consistono essenzialmente nell'emissione di diversi gas e di acque ad alta temperatura. **In parecchie regioni vulcaniche è questa l'unica testimonianza della presenza di magmi nel sottosuolo.** Numerosi sono i fenomeni di vulcanismo secondario, che possiamo raggruppare in **emissioni di gas** e di **acque calde**.

### ■ Emissioni di gas

Comprendono molte manifestazioni, che si distinguono, in base al gas che viene emesso, in:

- Fumarole ● **fumarole**, emissioni di vapore acqueo a temperatura elevata;
- Mofete ● **mofete**, emissioni di diossido di carbonio,  $\text{CO}_2$ , che, essendo più pesante dell'aria, ristagna al suolo (famosa in Italia la mofeta situata nella grotta del Cane, presso Agnano, Napoli);
- Putizze ● **putizze**, emissioni fredde di solfuro di idrogeno,  $\text{H}_2\text{S}$ , e altri gas sulfurei (sono presenti in Toscana);
- Solfatare ● **solfatare**, emissioni calde di composti gassosi dello zolfo, quali solfuro di idrogeno e diossido di zolfo (sono note in Italia le solfatare di Pozzuoli, nei pressi di Napoli);
- Soffioni ● **soffioni**, emissioni di vapore acqueo (formatosi per contatto dell'acqua con masse magmatiche profonde), a elevata temperatura e pressione (da 1 a 6 atmosfere), in forma di violenti getti, che possono essere sfruttati come forma di energia geotermica per produrre energia elettrica (in centrali geotermoelettriche, dove si sfrutta il getto di vapore in pressione per azionare una turbina a gas); famosi in Italia sono i soffioni boraciferi di Larderello, in Toscana (così chiamati per la presenza nei vapori anche di composti del boro).

### ■ Emissioni di acque calde

Le acque che circolano in profondità, a contatto con il magma, possono riscaldarsi e risalire in superficie, formando geysir o sorgenti termali.

- I geysir I **geysir** sono getti intermittenti di acqua calda e vapore acqueo, che, a intervalli regolari di tempo, irrompono in superficie attraverso un condotto, formando colonne alte fino a 50-60 m. Le acque meteoriche, penetrate nel terreno, e quelle che provengono dal magma stesso, dette **acque gio-**

**vanili**, si raccolgono nel condotto del geyser e vengono riscaldate dal calore ceduto dal magma; parte dell'acqua si trasforma in vapore, che esercita, sulla colonna d'acqua soprastante, una pressione che, superato un determinato valore, la proietta fuori del condotto, insieme al vapore; raccoltasi nuovamente altra acqua nel condotto, il ciclo riprende con sorprendente regolarità. I geyser sono diffusi in Islanda (dove vengono sfruttati per il riscaldamento domestico), in Nuova Zelanda e negli Stati Uniti d'America, nel parco di Yellowstone.

Le **sorgenti termali**, molto più comuni dei geyser, sono presenti in quasi tutti i distretti vulcanici; sono **sorgenti di acque calde**, di solito **molto ricche di sali minerali** da cui prendono il nome (per esempio, acque sulfuree, acque salso-bromo-iodiche ecc.) e che possono essere usate a scopo terapeutico. Le sorgenti termali sono assai diffuse in Italia e ben conosciute sin dall'antichità, come quelle delle terme di San Calogero, nell'isola di Lipari.

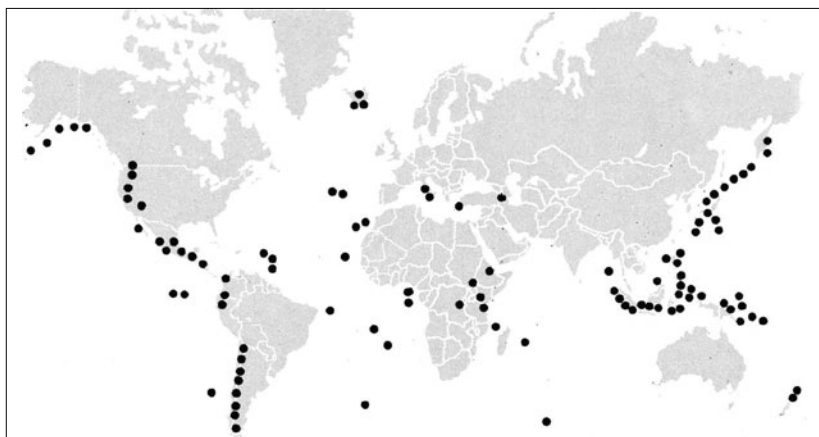
Sorgenti termali

## 14.7 La distribuzione geografica dell'attività vulcanica

La **distribuzione geografica dei vulcani non è casuale** (fig. 14.2): la maggior parte di essi si trova **lungo zone strette e allungate, che corrispondono ai margini delle placche**, al limite di alcuni continenti o nel mezzo degli oceani. I vulcani sono localizzati, per l'80%, in corrispondenza a zone di compressione, dove le placche tendono a convergere; per

Distribuzione ai margini delle placche

**Figura 14.2**  
*Distribuzione dei vulcani nel mondo.*





## I PUNTI CALDI

Alcuni vulcani non si trovano lungo i margini delle placche (come avviene nella maggior parte dei casi), ma all'interno delle placche stesse: questi vulcani si formano al di sopra dei cosiddetti punti caldi, nei quali risalgono, da zone profonde del mantello, "pennacchi" di magma in grado di "perforare" la litosfera ed emergere formando edifici vulcanici. Poiché le placche si muovono e dunque scorrono sul mantello sopra i punti di risalita del magma, dallo stesso punto caldo si possono formare più vulcani, che si presentano **allineati** se-

condo la direzione in cui avviene lo spostamento della placca; inoltre, essi sono tanto più vecchi quanto più ci si allontana dal punto caldo.

Esempi di vulcani formati da un punto caldo sono quelli che costituiscono l'arcipelago delle Hawaii, nell'oceano Pacifico, una serie di isole allineate in direzione nord-ovest per circa 5000 km; solo alcuni di questi vulcani, i più recenti, emergono dall'oceano formando isole; a causa dell'erosione degli agenti atmosferici e dell'oceano, i più antichi sono vulcani sottomarini spenti.

Distribuzione  
nei punti caldi

il 15% in zone di tensione, dove le placche divergono e per il restante 5% sono dispersi all'interno delle placche continentali e oceaniche, in corrispondenza dei cosiddetti **punti caldi** (v. riquadro).

**Si conoscono circa 700 vulcani attivi subaerei**, di cui circa il 60% è concentrato attorno alle coste dell'oceano Pacifico a formare la cosiddetta **cintura di fuoco circumpacifica**. Sono tutti caratterizzati da attività di tipo esplosivo (come i 108 vulcani attivi dell'Indonesia, i 2 del Caucaso, gli 8 delle Piccole Antille).

Un'altra fascia lungo la quale si trovano numerosi vulcani attivi corrisponde alle dorsali oceaniche: esse costituiscono il sistema di vulcani più esteso sulla Terra, in continua attività e a prevalente comportamento effusivo; solo in alcuni tratti le dorsali oceaniche emergono, formando isole come l'Islanda e le isole Azzorre, nell'oceano Atlantico.

## GLOSSARIO

### Caldera

Depressione con pareti ripide e fondo piatto, che si forma in seguito al crollo della parte sommitale del monte vulcanico; può ospitare un lago di origine vulcanica.

### Camino vulcanico

Condotto interno al vulcano, a forma subcilindrica (nei vulcani centrali) o di fessura lunga e stretta (nei vulcani lineari), attraverso il quale il magma risale in superficie.

### Cintura di fuoco (o cintura circumpacifica)

Fascia della crosta terrestre tettonicamente instabile, localizzata lungo tutto il perimetro dell'Oceano Pacifico, caratterizzata dalla presenza di numerosi vulcani attivi e da un'elevata sismicità.

### Cratere

Cavità a forma di imbuto situata alla sommità di un edificio vulcanico, allo sbocco del camino vulcanico, dalla quale avviene l'eruzione.

segue

**Diatrema**

Depressione della superficie terrestre generata da una grande esplosione vulcanica somigliante a un cratere circolare. Diatremi riempiti di piccoli laghetti caratterizzano il paesaggio di alcune regioni terrestri (Germania, Sudafrica), che apparentemente non sembrano di origine vulcanica.

**Eruzione**

Emissione di materiali da un vulcano, caratterizzata dalla fuoriuscita di lava (effusione), di materiale solido (eiezione) e gassoso (esplosione).

**Lahar**

Colate di fango che si formano in seguito a eruzioni con abbondante materiale pi-

roclastico, se il materiale incontra un ghiacciaio o se l'eruzione avviene mentre piove.

**Nube ardente**

Enorme nube di materiale incandescente, formata da miscele di gas, ceneri e polveri calde che si spostano a gran velocità lungo i fianchi dei vulcani, con effetti distruttivi.

**Vulcano**

Frattura della crosta terrestre attraverso la quale giungono in superficie materiali liquidi, solidi e gassosi e attorno alla quale, per deposizione e solidificazione dei materiali emessi, si formano edifici generalmente di forma conica.

## TEST DI VERIFICA

**1 Per viscosità di un magma si intende:**

- a** la sua tendenza a venire in superficie dal serbatoio in cui è alloggiato;
- b** la sua consistenza, che dipende dal contenuto in silice;
- c** la quantità di silice che esso contiene;
- d** la percentuale di quarzo in esso contenuto.

**2 In seguito alle eruzioni, si forma un vulcano a scudo quando:**

- a** la lava è molto densa e viscosa;
- b** in seguito a esplosioni;
- c** la lava è molto fluida e fuoriesce prevalentemente da un cratere centrale;
- d** la lava è poco viscosa e fuoriesce da un cratere a forma di fessura.

**3 Sono caratterizzati da emissioni di anidride carbonica:**

- a** geyser;
- b** solfatara;
- c** sorgenti termali;
- d** mofete;
- e** fumarole.

**4 Le eruzioni hawaiane sono:**

- a** esplosive, associate a lava basica;
- b** effusive, associate a lava basica;
- c** esplosive, associate a lava acida;
- d** effusive, associate a lava acida;
- e** esplosive, associate a vulcani a scudo.

**5 La maggior parte dei vulcani attivi è localizzata:**

- a** lungo le dorsali oceaniche;
- b** in corrispondenza alla cintura di fuoco;
- c** sopra ai punti caldi;
- d** sia **a**, sia **b**.

R

1 b 2 c 3 d 4 b 5 d

# 15 La sismicità

---

I **terremoti**, o **sismi**, sono rapide e brusche vibrazioni del suolo, dovute all'improvvisa liberazione di energia accumulatasi nelle rocce, a causa dei movimenti reciproci delle placche in cui la litosfera è suddivisa.

Al punto interno alla Terra in cui il terremoto si origina, detto **ipocentro**, corrisponde in superficie l'**epicentro**, dove i danni dovuti alla scossa sismica sono più gravi.

Durante un terremoto, si generano **onde sismiche** di vario tipo, che si propagano con diverse velocità sia all'interno della Terra, sia sulla superficie terrestre: esse possono essere registrate da strumenti detti **sismografi**, i quali tracciano grafici, i **sismogrammi**, che permettono di localizzare l'epicentro e stabilire l'intensità di un sisma. Si può valutare **l'intensità di un sisma** attraverso due scale: la **scala Mercalli**, che si basa sulla rilevazione degli **effetti** di un terremoto su edifici, persone e ambiente; e la **scala Richter**, che esprime, invece, la **magnitudo**, correlata alla quantità di energia liberata da un sisma.

Come i fenomeni vulcanici, anche i sismi sono distribuiti in particolari fasce della superficie terrestre, che corrispondono **ai margini delle placche litosferiche**.

## 15.1 La natura e l'origine di un terremoto

Che cosa sono i terremoti

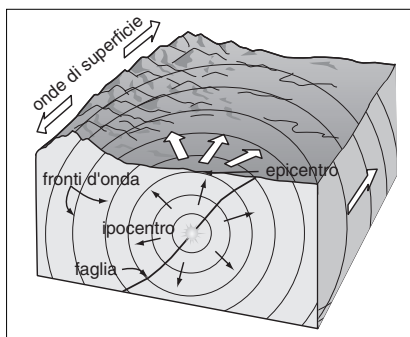
I terremoti, detti anche **sismi** (dal greco *seismós*, scossa), sono **rapide e brusche vibrazioni del suolo**, dovute alla repentina **liberazione di energia accumulatasi** nelle rocce litosferiche. Ciò si verifica **a causa dei movimenti reciproci delle placche in cui la litosfera è suddivisa** (per esempio, le placche si scontrano l'una contro l'altra, scorrono l'una rispetto all'altra o si allontanano l'una dall'altra). Tali movimenti (v. cap. 11) sono all'origine di tensioni, rispetto alle quali le placche si comportano come corpi rigidi, fratturandosi.

Come si accumula e si libera l'energia nella litosfera

Quando due blocchi di roccia separati da una frattura, detta **falla** (v. cap. 13), sono sottoposti a tensioni, per un certo tempo i due blocchi si comportano come corpi plastici, deformandosi, ma non si muovono (perché frenati dall'attrito tra le due superfici a contatto della frattura) e accumulano energia; ma quando la tensione aumenta fino a superare la resistenza per attrito, i due blocchi rocciosi si comportano come corpi rigidi e improvvisamente "scattano", si muovono l'uno rispetto all'altro, liberando bruscamente l'energia ela-

**Figura 15.1**

Posizione dell'ipocentro  
e dell'epicentro  
di un terremoto.



stica che si era prima accumulata sotto forma di **vibrazioni**: queste si **propagano all'interno della Terra sotto forma di onde sismiche** (v. par. 15.3), che, giunte in superficie, causano il terremoto e sono avvertite sotto forma di scosse.

Il punto interno alla Terra da cui si originano le vibrazioni che causano il terremoto è detto **ipocentro** (dal greco *hypó*, sotto), o fuoco del terremoto; quello sulla superficie terrestre sulla verticale dell'ipocentro è detto **epicentro** (dal greco *epi*, sopra). La propagazione delle onde sismiche dall'ipocentro alla superficie è rappresentata nella figura 15.1. Nell'epicentro e nelle sue immediate vicinanze si registrano i danni più gravi, che via via si riducono allontanandosi da esso.

Ogni anno sulla Terra si verifica circa un milione di terremoti, in media uno ogni 30 secondi, la maggior parte dei quali, fortunatamente, non ha effetti sulle costruzioni e non è avvertita dalle persone: insieme al vulcanismo, essi sono una delle manifestazioni delle notevoli forze che si originano all'interno della Terra.

Ipocentro  
ed epicentro

## 15.2 La classificazione dei terremoti

In base alla **profondità dell'ipocentro**, i terremoti vengono classificati in **superficiali** (ipocentro compreso fra 0 e 70 km di profondità), **intermedi** (ipocentro fra 70 e 300 km di profondità) e **profondi** (ipocentro fra 300 e 720 km di profondità). La maggior parte dei terremoti che si verificano ogni anno (circa il 90%) è superficiale. Non sono noti terremoti con ipocentro più profondo di 720 km (a testimonianza del fatto che, oltre questa profondità, con l'aumentare della temperatura e della pressione, le rocce manifestano un comportamento plastico e non rigido, condizione essenziale perché si verifichi un sisma).

Terremoti  
superficiali,  
intermedi e profondi

Terremoti tettonici	Va precisato che i terremoti dovuti a movimenti lungo faglie, o <b>terremoti tettonici</b> , fin qui descritti non sono gli unici, anche se di gran lunga i più comuni e i più importanti. Anche altre cause naturali ( <b>vulcanismo, frane</b> ) e artificiali (per esempio, <b>esplosioni</b> ) provocano vibrazioni nel suolo, ma l'energia messa in gioco è notevolmente inferiore a quanto accade nel caso dei terremoti tettonici.
Terremoti vulcanici	I <b>terremoti vulcanici</b> , legati all'attività vulcanica, sono dovuti alla risalita del magma entro la crosta terrestre e nel cammino vulcanico; meno frequenti dei precedenti, il loro ipocentro è molto superficiale, si manifestano con sciame di piccole scosse e si risentono su aree limitate.
Terremoti di crollo	I <b>terremoti di crollo</b> sono piccole scosse che avvengono per crollo della volta di grotte, tipici delle zone carsiche, o per la caduta di frane (fra i terremoti di origine naturale, sono i meno frequenti, i più superficiali e quelli più localizzati).
Terremoti da esplosione	I <b>terremoti da esplosione</b> , di origine artificiale, sono prodotti dalla detonazione di dispositivi chimici o nucleari e vengono appositamente provocati dall'uomo, anche a scopo di indagine dell'interno della Terra o per la ricerca geologica di idrocarburi e di minerali.

### 15.3 Le onde sismiche

Gli effetti distruttivi dei terremoti sono dovuti alla propagazione delle **onde sismiche**, che si originano sia dall'ipocentro, sia dall'epicentro.

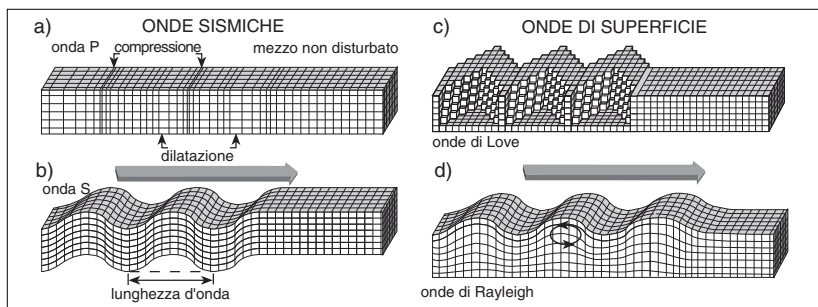
Che cosa sono le onde sismiche

Le **onde sismiche sono onde elastiche** (attraverso le quali, cioè, l'energia elastica può essere trasportata lontano dal punto in cui si è originata), **che hanno bisogno di un mezzo attraverso cui propagarsi**; la propagazione avviene **attraverso un meccanismo di deformazione delle rocce e di "forze di richiamo"** che si oppongono a tali deformazioni. Si possono individuare **due tipi principali di deformazioni**: la **compressione pura**, che provoca variazioni di volume nelle rocce, ma non di forma, e lo **sforzo di taglio**, che causa, invece, variazioni di forma, ma non di volume, delle rocce. A causa della coesione esistente fra le particelle costituenti, nelle rocce, durante la compressione e lo sforzo di taglio a cui sono sottoposte, si generano **"forze di richiamo"**, che tendono a opporsi alle deformazioni stesse e a riportare il volume e la forma della massa rocciosa alla situazione iniziale.

I due tipi di deformazione delle rocce

#### ■ I tipi di onde sismiche

Le onde sismiche si differenziano in diversi tipi per il modo e per la velocità di propagazione: onde longitudinali,



onde trasversali e onde superficiali (fig. 15.2).

Le **onde longitudinali** sono onde di compressione, che si originano dall'ipocentro e si propagano entro il volume delle rocce per successive compressioni e dilatazioni delle rocce stesse, di cui causano variazioni di volume. Sono chiamate onde longitudinali perché le oscillazioni degli infiniti piani in cui si può immaginare di dividere il corpo roccioso avvengono nella stessa direzione di propagazione dell'onda. Sono anche dette **onde P** (primarie), perché sono le prime a giungere in superficie e a essere registrate dai sismografi (v. par. 15.4), propagandosi a una velocità compresa tra 6,2 e 8,2 km/sec, a seconda della densità dei materiali che attraversano; possono propagarsi sia attraverso la roccia solida, sia attraverso un materiale liquido (magma o acqua).

Le **onde trasversali** si propagano dall'ipocentro, sono generate da forze di taglio e provocano nelle rocce variazioni di forma, ma non di volume; sono dette trasversali perché provocano oscillazioni delle particelle delle rocce dal basso verso l'alto e viceversa, perpendicolarmente alla direzione di propagazione. Vengono anche chiamate **onde S** (secondarie) perché, essendo più lente delle onde P (3,6-4,7 km/sec) giungono in superficie per seconde. Le onde S non si propagano nei liquidi e questa circostanza ha permesso di ipotizzare la presenza all'interno della Terra di un nucleo esterno liquido (v. par. 11.1 e 11.2, da p. 132).

Le **onde superficiali** si originano nell'epicentro quando le onde sismiche longitudinali e trasversali (chiamate nel loro insieme anche onde di volume, o interne), giunte sulla superficie terrestre, interagiscono con essa. Le onde superficiali si propagano appunto in superficie e sono responsabili dei danni maggiori; possono essere distinte in due tipi:

- **onde L** (di Love), la cui propagazione provoca oscillazioni delle particelle delle rocce, trasversali alla direzione di pro-

**Figura 15.2**

*Rappresentazione delle onde sismiche longitudinali (onda P, od onde di compressione) e trasversali (onda S, od onde di taglio) e delle onde superficiali (di Love e di Rayleigh).*

Onde longitudinali, o P

Onde trasversali, o S

Onde superficiali

Onde L

## Onde R

pagazione, ma solo nel piano orizzontale, parallelo alla superficie terrestre;

● **onde R** (di Rayleigh), che provocano un moto ellittico delle particelle delle rocce, in un piano verticale alla direzione di propagazione delle onde.

Le onde superficiali possono percorrere lunghe distanze prima di estinguersi, viaggiando più lentamente delle onde P e S: la velocità di propagazione delle onde L è di circa 3 km/s, di poco inferiore a quella delle onde R (circa 2,7 km/s).

## 15.4 La registrazione dei terremoti

Le vibrazioni del suolo dovute alle onde sismiche, la loro ampiezza e la loro durata possono essere registrate da strumenti chiamati **sismografi**, che traducono il complesso movimento oscillatorio del suolo durante un terremoto in una registrazione grafica detta **sismogramma**.

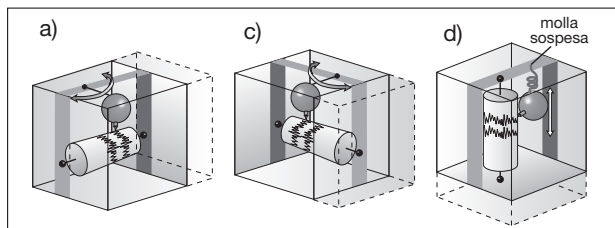
### ■ I sismografi

Un sismografo è composto da una struttura solidale con il suolo, in grado quindi di vibrare insieme a esso, e da una massa pesante, sospesa tramite un pendolo o con una molla, che rimane invece inerte (non risente, cioè, delle vibrazioni): questa massa è munita di un pennino scrivente, a contatto con un rullo di carta millimetrata, montato su un tamburo rotante, a sua volta collegato alla struttura solidale con il suolo. Se il suolo vibra, la massa rimane ferma per inerzia e il pennino lascia sulla carta millimetrata una traccia, il sismogramma, che registra le vibrazioni e quindi le onde sismiche. Una stazione sismologica è generalmente dotata di tre sismografi, uno verticale e due orizzontali, ciascuno dei quali registra le oscillazioni del suolo in una delle tre direzioni fondamentali dello spazio (fig. 15.3).

Sulla superficie terrestre sono distribuite, in base a opportuni criteri, diverse **stazioni sismiche**, che nel loro insieme costituiscono una rete sismica che permette di “monitorare” tut-

La struttura  
di un sismografo

Le stazioni sismiche

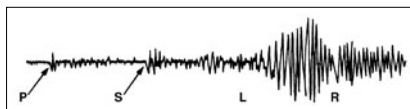


**Figura 15.3**

Modelli di sismografo che registrano il moto del suolo nelle due componenti orizzontali (a e b) e nella componente verticale (c).

**Figura 15.4**

Tracciato  
di un sismogramma.



ta la superficie terrestre: il confronto dei dati ottenuti dalle diverse stazioni sismiche consente di localizzare rapidamente l'epicentro di un terremoto e di valutarne l'intensità.

### ■ La lettura di un sismogramma

Il tracciato di un sismogramma (fig. 15.4) permette di distinguere le diverse onde sismiche generate da un terremoto: l'operazione è facilitata se il sismografo è posto a una certa distanza dall'epicentro, poiché, propagandosi con velocità diverse, le onde sismiche giungono al sismografo in tempi diversi (risultando dunque più facilmente distinguibili).

Procedendo da sinistra verso destra nella lettura di un sismogramma, si notano prima lievissime oscillazioni dovute al continuo tremolio del suolo per cause diverse da un sisma (per esempio, il traffico, il frangersi delle onde sulle coste ecc.); poi si osservano oscillazioni più evidenti, che indicano l'arrivo delle onde P, seguite dalle onde S (segnalate da un improvviso cambiamento dell'ampiezza dell'oscillazione), poi dalle onde L e infine dalle R (che provocano oscillazioni di ampiezza maggiore delle precedenti).

La successione  
delle onde sismiche

Il confronto tra più sismogrammi che si riferiscono allo stesso sisma, registrati da stazioni sismiche diverse, consente di localizzare con precisione l'epicentro del terremoto: infatti, i diversi tipi di onde prodotte in un terremoto si propagano con velocità differenti: quanto più ci si allontana dall'epicentro, tanto maggiore è il ritardo fra il momento in cui iniziano ad arrivare le onde più veloci e quello in cui giungono le onde più lente; la conoscenza del ritardo con cui le onde S giungono al sismografo rispetto alle onde P, unita alla conoscenza della velocità di propagazione delle due onde, permette di calcolare la distanza della stazione sismica dall'epicentro del sisma.

Come si individua  
l'epicentro

## 15.5 L'intensità dei terremoti

Un primo tentativo per indicare l'intensità di un terremoto si deve al sismologo e vulcanologo italiano G. Mercalli (1850-1914), che (1902) ideò una scala basata sull'osservazione degli effetti di un sisma su costruzioni, persone e ambiente, divisa in 10 gradi progressivi di gravità; gli effetti di un sisma vengono oggi riferiti alla scala Mercalli modificata, che com-



La scala Mercalli modificata

prende 12 gradi (tab. 15.1): il grado I corrisponde a scosse avvertite solo dai sismografi, senza danni a edifici o persone; il grado XII equivale, invece, a una grande catastrofe e alla distruzione totale delle costruzioni. A ogni località in cui è stato avvertito il sisma viene assegnato un grado di intensità, che risulterà massimo nella zona in corrispondenza all'epicentro e decrescente verso località più lontane. Sono state elaborate diverse scale Mercalli modificate, che tengono conto delle caratteristiche costruttive degli edifici in diverse aree: quella più utilizzata in Europa occidentale è la cosiddetta scala MCS (Mercalli- Cancani-Silberg).

La scala Richter

La scala Mercalli modificata è di tipo empirico, basata sulla descrizione degli effetti, e risulta dunque uno strumento poco preciso e, soprattutto, non permette di confrontare tra loro le intensità reali dei terremoti. Per superare questa difficoltà è stata introdotta (1935) una scala "quantitativa", la **scala Richter**, dal nome del sismologo statunitense F. Richter (1900-1985), detta anche scala della magnitudo, poiché essa misura la **magnitudo** di un terremoto, cioè l'**energia meccanica** che si sprigiona dall'ipocentro. Per valutare l'intensità di un terremoto, Richter propose di misurare l'ampiezza delle onde sismiche generate da un terremoto e registrate dai sismografi.

Il calcolo della magnitudo

Matematicamente, la **magnitudo**,  $M$ , è così definita:

$$M = \log A/A_0 = \log A - \log A_0$$

**Tabella 15.1** La scala Mercalli modificata

GRADO	SCOSSA	DESCRIZIONE
I	strumentale	avvertita solo dai sismografi
II	leggerissima	avvertita solo da persone particolarmente sensibili
III	leggera	avvertita da persone a riposo, soprattutto ai piani alti
IV	mediocre	avvertita anche camminando, oscillazione di oggetti appesi
V	forte	risveglio di persone addormentate, suono di campane, caduta di oggetti
VI	molto forte	lievi danni agli edifici, oscillano gli alberi
VII	fortissima	allarme generale, crepe nei muri, caduta di intonaci
VIII	rovinosa	caduta di camini, gravi danni agli edifici
IX	disastrosa	crollo di alcuni edifici, rottura di condutture, crepe nel terreno
X	disastrosissima	crollo di molti edifici, rotaie piegate, grandi crepacci nel suolo, frane
XI	catastrofica	pochi edifici superstiti, ponti distrutti, tutti i servizi (ferrovie, condutture, cavi) fuori uso, grandi frane, inondazioni
XII	grande catastrofe	distruzione totale, oggetti scagliati in aria, sollevamenti e abbassamenti del suolo a onde

dove  $A$  indica la massima ampiezza delle onde registrate da un sismogramma di un terremoto sconosciuto e  $A_0$  l'ampiezza massima delle onde generate da un terremoto scelto come riferimento (terremoto standard, cioè un terremoto che, su un sismografo posto a 100 km dall'epicentro, produce un sismogramma con ampiezza massima delle onde pari a 0,001 mm). La scala Richter non è quindi suddivisa in gradi e non ha limiti né inferiori (se non quelli legati alla capacità di percezione dei sismografi), né superiori: in questo secolo la massima magnitudo misurata è stata pari a 8,5-9. Nota la magnitudo di un sisma, si può determinare l'energia,  $E$  (in erg), che esso ha liberato secondo la formula:

$$\log E = 12 + 1,5 M$$

dove  $M$  è la magnitudo (dalla formula si deduce che l'aumento di 1 unità della magnitudo corrisponde a una liberazione di energia 30 volte maggiore).

La scala Richter permette di valutare con precisione anche l'intensità dei terremoti che si verificano in zone desertiche, o il cui epicentro è situato su fondali marini, cosa che sarebbe impossibile con la scala Mercalli (poiché in tali zone non si rilevano effetti su costruzioni e persone).

Non c'è corrispondenza fra intensità valutata con la scala Mercalli e magnitudo, poiché i terremoti superficiali che si verificano in zone densamente popolate possono produrre molti più danni di terremoti di uguale magnitudo che si verificano in zone desertiche o con ipocentro profondo.

Una scala  
quantitativa

Differenze tra scala  
Richter  
e scala Mercalli

## 15.6 Distribuzione geografica dei terremoti

I **terremoti** non sono distribuiti in misura uniforme sulla superficie terrestre, ma **si manifestano quasi esclusivamente in alcune fasce del pianeta**, che vengono perciò dette **sismicamente attive**, mentre sono assenti in altre fasce, dette asismiche (tuttavia, queste ultime, pur non essendo sede di epicentri, risentono gli effetti dei terremoti dovuti al propagarsi delle onde sismiche dalle contigue zone sismicamente attive).

Osservando la distribuzione degli epicentri, si nota che quasi tutti sono localizzati in alcune fasce strette e allungate in corrispondenza dei margini delle placche litosferiche, lungo le fosse oceaniche, le catene montuose recenti, le dorsali oceaniche e le fosse tettoniche continentali; si può inoltre constatare che esse coincidono con le zone di intensa attività vulcanica (v. cap. 14).

Circa l'80% dei terremoti si verifica in corrispondenza del-

Le fasce  
sismicamente attive

## I MAREMOTI, O TSUNAMI

I maremoti sono particolari tipi di onde, di eccezionale dimensione, chiamati anche "tsunami", termine giapponese che significa "onda del porto", con cui si indica l'improvvisa comparsa sul mare di un'onda di grande altezza e notevole estensione, che si sposta a elevata velocità e si abbatte con violenza sulle coste.

Possono originarsi maremoti in seguito a eventi sismici, a eruzioni vulcaniche, a frane sottomarine e a impatti di meteoriti.

I sismi possono originare maremoti in due modi diversi.

1. La tensione accumulatasi per motivi tettonici nelle rocce del fondale marino si scarica all'improvviso, con la formazione di fratture e lo spostamento di blocchi rocciosi: questo causa i cosiddetti terremoti sottomarini, cioè con epicentro sui fondali marini. La superficie del mare inizia a oscillare cercando di ritornare al livello normale e dando origine alle onde di maremoto.

2. Un terremoto con epicentro sulla terraferma può provocare enormi frane, che,

cadendo in mare o lungo le scarpate dei fondali marini, causano onde che si propagano analogamente a quanto succede gettando un sasso in uno stagno.

La particolarità e la pericolosità dei maremoti è dovuta all'eccezionale dimensione delle onde che si generano: la loro lunghezza è talora superiore ai 200 km e la velocità di propagazione può arrivare a 200 m/s. In mare aperto, queste onde non causano danni, perché la loro altezza è di appena qualche decina di centimetri, ma via via che si avvicinano alle coste la loro altezza aumenta progressivamente (fino a 30 m) e si trasformano in enormi frangenti, che provocano erosione della costa, inondazione dell'entroterra, distruzione di case e vittime. Data la particolare distribuzione delle aree sismiche e vulcaniche, quasi tutte le coste sono soggette al rischio di maremoti, con alcune differenze di intensità: l'energia delle onde è amplificata nelle baie e negli estuari dei fiumi, mentre le coste rettilinee sono le più riparate.

La Cintura di Fuoco  
circumpacifica

**la Cintura di Fuoco circumpacifica** ed è legata al fenomeno della subduzione (l'immersione di una placca al di sotto di un'altra). Questa fascia è caratterizzata dalla presenza di numerosi archi insulari, lungo le coste occidentali dell'oceano Pacifico, dalle isole Aleutine fino agli archi insulari a est dell'Australia: gli ipocentri dei terremoti che si manifestano lungo questa fascia si trovano a profondità variabili. Le coste orientali dell'oceano Pacifico sono caratterizzate dalla presenza di profonde fosse oceaniche e archi magmatici continentali; la profondità degli ipocentri dei terremoti lungo questa fascia aumenta via via che ci si sposta dalla fossa oceanica verso gli archi magmatici continentali e comunque non supera i 720 km (v. par. 15.2).

Le catene montuose  
recenti

Poco meno del 20% dei terremoti è localizzato lungo le catene montuose di origine recente, in corrispondenza del sistema montuoso che si estende dalle Alpi fino all'Himalaya: l'origine dei sismi è in questo caso legata allo scontro tra placche continentali.

Dorsali oceaniche

Infine, una sismicità significativa, anche se non intensa, si manifesta in corrispondenza delle dorsali oceaniche e della fossa tettonica dell'Africa orientale: legati ai movimenti di di-

vergenza tra le placche, i terremoti hanno in questo caso ipocentri superficiali.

## GLOSSARIO

### Asismica

Regione pressoché esente da terremoti.

### Epicentro

Punto sulla superficie terrestre situato sulla verticale dell'ipocentro, in cui un sisma è avvertito maggiormente.

### Intensità

Riferita a un sisma, ne indica l'insieme degli effetti sulle persone, sulle costruzioni e sul terreno.

### Ipicentro

Punto interno alla Terra, collocato nella litosfera, in cui si origina il terremoto e da cui si propagano le onde sismiche.

### Magnitudo

Grandezza che esprime l'intensità di un sisma misurando l'energia meccanica che esso libera.

### Terremoto

Vibrazione, più o meno rapida e violenta, del suolo originata da cause endogene.

### Tsunami

Termine giapponese col quale si indicano onde di enormi dimensioni, che si abbattano sulle coste causando distruzioni; detti anche maremoti, sono causati da un terremoto sottomarino o da un'eruzione vulcanica sottomarina.

## TEST DI VERIFICA

**1 Il punto in cui si originano i terremoti è detto:**

- a epicentro;
- b ipocentro;
- c sia a, sia b, perché i due termini coincidono.

**2 Nell'ipocentro si originano le onde sismiche:**

- a R e L;
- b P e S;
- c solo P;
- d solo L.

**3 Le onde P si propagano:**

- a nei solidi;
- b nei liquidi;
- c nei solidi e nei liquidi.

**R**

1 b; 2 b; 3 c; 4 b; 5 c; 6 a.

**4 La scala Richter indica:**

- a gli effetti di un sisma;
- b la magnitudo di un sisma;
- c la forza sismica.

**5 Con la scala Mercalli è difficile misurare l'intensità di un terremoto nel deserto perché:**

- a nei deserti i sismografi non funzionano;
- b nei deserti non si generano i terremoti;
- c la scala misura gli effetti diretti del terremoto sugli edifici e sulle persone.

**6 Le onde di compressione sono le:**

- a onde P;
- b onde S;
- c onde L;
- d onde R.

# 16 La storia della Terra

---

La Terra, dalla sua **origine risalente a circa 4,6 miliardi di anni fa** sino a oggi, passando attraverso l'epoca in cui **è comparsa la vita (circa 3,5 miliardi di anni fa)** ha subito continue modificazioni. Per stabilire l'età della Terra e ricostruirne la storia, gli scienziati si sono avvalsi di **speciali documenti: le rocce e i fossili**, cioè i resti di organismi animali e vegetali vissuti nel passato e giunti fino a noi all'interno delle rocce sedimentarie. Utilizzando metodi di **datazione relativa**, si è potuta stabilire la sequenza degli eventi che hanno caratterizzato la storia della Terra; con metodi di **datazione assoluta**, soprattutto con la **radiometria**, si è potuto invece stabilire l'età della Terra e datare precisamente gli eventi. **La storia della Terra è stata quindi suddivisa in cinque ere geologiche**, cioè lunghissimi periodi di tempo, ciascuno dei quali è stato caratterizzato da particolari fenomeni geologici ed eventi biologici.

## 16.1 Il tempo geologico

L'età della Terra

La ricostruzione della storia della Terra implica la possibilità di stabilire la sequenza degli eventi succedutisi attraverso l'interpretazione di documenti. Fino a due secoli fa, per ricostruire la storia della Terra i naturalisti si basavano per lo più sull'interpretazione letterale della Bibbia e attribuivano così alla Terra un'età di poche migliaia di anni. **La misura del tempo geologico**, cioè dell'età della Terra, con l'attribuzione di date relativamente precise, **è una conquista recente** e si basa sullo studio di particolari documenti: le rocce e i **fossili** contenuti in alcune di esse. Attualmente, **l'età della Terra è valutata in 4,6 miliardi di anni** e, dalla sua origine, essa ha subito e continuamente subisce l'azione di forze endogene (che si originano all'interno della Terra, quali vulcanismo e sismi) ed esogene (che si originano all'esterno della Terra, cioè tutti i fenomeni atmosferici), che ne modificano l'aspetto; inoltre, caso unico tra i pianeti del sistema solare, **circa 3,5 miliardi di anni fa su di essa ha avuto origine e si è poi evoluta la vita**.

La nascita della vita

I numerosi metodi di datazione oggi utilizzati possono essere distinti in **metodi di datazione relativa**, che **permettono solo di stabilire la sequenza degli eventi**, cioè l'ordine col quale si sono succeduti (v. par. 16.3), e **metodi di datazione assoluta**, che **consentono invece di datare esattamente un evento**, indicando quando si è verificato e la sua durata (v. par. 16.4).

## 16.2 I fossili

I **fossili** sono reperti molto importanti, che permettono non solo di ricostruire la storia della Terra, ma anche la storia della vita che si è evoluta sulla Terra. Infatti, già il naturalista francese G. Cuvier (1769-1832), considerato il fondatore della scienza che si occupa dello studio dei fossili, la **paleontologia** (dal greco *palaiós*, antico e *óntos*, essere), osservò che i fossili degli organismi rinvenuti nelle rocce erano assai dissimili dagli organismi viventi, deducendone che gli organismi si evolvono con il passare del tempo.

La paleontologia

Il termine **fossile** (dal latino *fodĕre*, scavare) indica **qualsiasi resto di organismo animale o vegetale** (fossile diretto) o di sue tracce (fossile indiretto), vissuto in epoche passate, **giunto fino a noi grazie a processi detti di fossilizzazione** e conservatosi all'interno delle rocce sedimentarie.

Che cos'è un fossile

In condizioni normali, dopo la loro morte gli organismi sono soggetti alla decomposizione a opera di microrganismi detti decompositori, che trasformano le sostanze organiche complesse di cui sono composti in sostanze inorganiche semplici (che vengono restituite all'ambiente). Il processo di trasformazione di un organismo in fossile, o fossilizzazione, presuppone condizioni particolari, che facciano sì che l'organismo, dopo la morte, sia rapidamente seppellito da sedimenti e isolato dall'ambiente aereo o acquatico, in modo da sottrarlo all'opera di agenti (fisici, chimici e biologici) che ne provocherebbero la decomposizione.

Il processo di fossilizzazione

La fossilizzazione, secondo le modalità con cui avviene, permette la **conservazione diretta** di alcune parti dell'organismo, la **conservazione indiretta** di sue tracce o la **conservazione integrale** dell'organismo.

### ■ Conservazione diretta

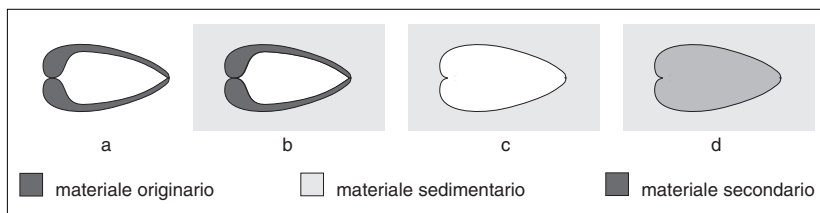
Può avvenire attraverso processi di mineralizzazione o di carbonizzazione.

Nel **processo di mineralizzazione**, i sali minerali originariamente presenti nell'organismo vengono arricchiti o sostituiti con altri sali minerali chimicamente più stabili, disciolti nelle acque circolanti nei sedimenti dove è sepolto l'organismo. I fossili mineralizzati sono costituiti generalmente dai minerali calcite, silice o fosfato di calcio.

Mineralizzazione

La **carbonizzazione** è il processo di fossilizzazione più comune per i vegetali, dovuto all'azione di batteri anaerobi (cioè che vivono fuori dal contatto con l'aria), i quali progressivamente eliminano dai tessuti vegetali azoto, idrogeno e ossigeno e li arricchiscono in carbonio (v. a p. 118). La

Carbonizzazione

**Figura 16.1**

*Fossilizzazione indiretta: una conchiglia di bivalve (a), sepolta da materiale sedimentario fine (b), ha lasciato nel materiale sedimentario la sua impronta (c); il materiale secondario, che riempie poi la cavità all'interno dell'impronta, costituisce il calco (d).*

Impronta e calco

Tracce

La mummificazione naturale

carbonizzazione ha permesso la conservazione di strutture anche molto delicate, come le foglie, di cui si può osservare l'impronta scura carboniosa rimasta in alcune rocce sedimentarie.

### ■ Conservazione indiretta

In questo caso **non sono visibili direttamente parti degli organismi, ma se ne riconoscono impronte, calchi o tracce della loro attività.**

Per esempio, se una conchiglia di bivalve, un tipo di mollusco (fig. 16.1), viene sepolta da materiale sedimentario fine, può accadere che il guscio si disciolga e lasci nel materiale sedimentario la sua **impronta**. La cavità rimasta all'interno dell'impronta può essere a sua volta riempita da altro materiale fine e costituire il **calco**, che riproduce le caratteristiche esterne dell'organismo.

Le **tracce** di un organismo sono rappresentate da ogni tipo di reperto che ne indichi la presenza o l'attività (orme, gallerie, coproliti); esse forniscono utili informazioni sulle associazioni faunistiche, sull'ecologia e sulle dimensioni degli organismi.

### ■ Conservazione integrale

Può raramente accadere che si conservi tutto l'organismo, inglobato, per esempio, all'interno dell'ambra o del permafrost o in seguito a mummificazione naturale.

Piccoli organismi animali invertebrati, soprattutto insetti, si conservano perfettamente integri per inclusione in **ambra**, resina fossile solidificata prodotta da antiche conifere.

Alcuni mammut sono stati rinvenuti in Siberia con le carni ancora intatte e con il loro folto mantello peloso, inclusi nel **permafrost**, strato di suolo permanentemente ghiacciato presente in alcune zone della Terra ad alte latitudini.

La **mummificazione naturale** si verifica quando i tessuti e le parti molli dell'organismo si disseccano e si conservano senza degradarsi completamente: questo processo può avvenire in luoghi asciutti e chiusi o con climi semia-

ridi. Sono così potuti pervenire a noi resti mummificati di uomini preistorici.

### 16.3 Metodi di datazione relativa

I **metodi di datazione relativa** delle rocce e dei fossili **consentono di stabilire la successione reciproca con la quale si sono verificati eventi**, geologici o biologici, ma non di assegnarne una data.

Tre sono i criteri seguiti: il criterio stratigrafico, il criterio paleontologico e il criterio litologico.

Il **criterio stratigrafico** si basa sull'osservazione che, in generale, in una successione di strati sedimentari, quelli che si trovano più in basso sono più antichi degli strati superiori (v. cap. 9), per cui anche la sequenza degli eventi geologici che li ha originati segue lo stesso ordine cronologico. Tuttavia, bisogna tener presente che non sempre questo criterio è applicabile, poiché, a causa dei movimenti tettonici della litosfera (v. cap. 12 e 13), a volte gli strati sedimentari possono presentarsi in posizioni diverse da quelle originarie, (per esempio, gli strati possono essere verticali o addirittura rovesciati) e in tal caso è necessario utilizzare altri criteri di datazione.

Il **criterio paleontologico** si basa sull'uso dei fossili per datare gli strati rocciosi in cui essi si trovano, poiché in genere tali strati possiedono la loro stessa età. Ammettendo che la vita si sia evoluta più o meno omogeneamente su tutta la Terra, la presenza di determinati fossili permette di stabilire se una roccia che li contiene sia più antica o più recente rispetto a un'altra.

Tuttavia, non tutti i fossili sono utili per questo tipo di datazione, ma solo alcuni, detti **fossili guida**, appartenenti a specie animali e vegetali che hanno avuto una rapida evoluzione (e quindi sono vissuti in un periodo di tempo relativamente breve) e un'ampia diffusione geografica. Si tratta soprattutto di fossili di organismi marini inclusi in rocce sedimentarie (quali le **ammoniti**, molluschi cefalopodi con la conchiglia a spirale, fossili guida dell'era Mesozoica; v. par. 16.4) o le diverse specie dei **nummuliti**, (foraminiferi di grandi dimensioni, fossili guida per il Paleogene, la prima parte dell'era Cenozoica). Medesimi fossili guida permettono anche di correlare tra loro strati rocciosi di aree geografiche differenti.

Infine, bisogna tener presente che talvolta nelle rocce sedimentarie clastiche si trovano i cosiddetti **fossili rimaneggiati**, relativi cioè a organismi vissuti in luoghi e in tempi di-

Criterio stratigrafico

Criterio paleontologico

I fossili guida

I fossili rimaneggiati



Criterio litologico

versi da quelli in cui si è formato il sedimento e che erano contenuti in altre rocce sedimentarie dalla cui degradazione derivano i clasti stessi: (i fossili rimaneggiati non sono perciò utili per datare lo strato roccioso in cui si trovano). Il **criterio litologico**, applicabile ad aree limitate, si basa sul fatto che rocce uguali hanno la stessa età; esso è valido limitatamente a depositi formatisi all'interno di singoli bacini (per esempio, un bacino lacustre o un mare).

## 16.4 Metodi di datazione assoluta

La misura  
del decadimento  
radioattivo

**I metodi di datazione assoluta permettono di attribuire una determinata età alle rocce e a fossili** e dunque anche all'evento che li ha originati, specificando la sua durata.

Tra i diversi metodi di datazione assoluta rivestono particolare importanza i **metodi radiometrici** (di seguito trattati), che si basano sulla misura della **radioattività residua** di rocce e di fossili (altri metodi di datazione assoluta sono trattati nel riquadro a p. 194).

La **radioattività** è una proprietà di alcuni isotopi instabili di certi elementi, che nel tempo si trasformano spontaneamente in isotopi stabili dello stesso elemento o di un elemento differente, attraverso il fenomeno del **decadimento radioattivo** consistente nell'emissione di raggi (o particelle) alfa, beta o gamma. Ciascun isotopo radioattivo è caratterizzato da un determinato valore del **tempo di dimezzamento**, che rappresenta il tempo necessario perché una certa massa di un isotopo radioattivo si riduca a metà. Per esempio, l'uranio-238 ( $^{238}\text{U}$ ) si trasforma in piombo-206 ( $^{206}\text{Pb}$ ) con un tempo di dimezzamento di 4,5 miliardi di anni; ciò significa che se si parte da 1 g di uranio-238, dopo 4,5 miliardi di anni, la metà, 0,5 g, si sarà trasformata in piombo-206; dopo altri 4,5 miliardi di anni, l'uranio si sarà ulteriormente dimezzato a 0,25 g e così via. In base al **rapporto tra la quantità di un elemento radioattivo ancora presente in una roccia e la quantità di elemento stabile** (risultante dal decadimento del primo), si può, conoscendo il tempo di dimezzamento, risalire, con opportune formule, all'età della roccia o del fossile.

Metodo  
del radiocarbonio

Per la datazione di reperti fossili relativamente recenti (di età non superiore a 40 000 anni) si ricorre al **metodo del radiocarbonio**, con il quale si misura il supporto tra le quantità dei due isotopi del carbonio: il carbonio-14 ( $^{14}\text{C}$ ) radioattivo e il carbonio-12 ( $^{12}\text{C}$ ) stabile. **Nell'atmosfera i due isotopi del carbonio sono contenuti in un determinato rapporto**, che rimane costante anche negli organismi ve-

**getali**, poiché essi fissano il carbonio atmosferico, contenuto nel diossido di carbonio,  $\text{CO}_2$ , attraverso la fotosintesi clorofilliana e **negli organismi animali**, che assimilano il carbonio attraverso l'alimentazione. Al momento della morte, in un organismo vegetale si interrompe il processo fotosintetico, mentre in un animale cessa l'assimilazione di sostanze contenenti carbonio; l'isotopo  $^{14}\text{C}$ , instabile, inizia a decadere, trasformandosi in azoto-14, ( $^{14}\text{N}$ ), con un tempo di dimezzamento pari a 5730 anni, mentre l'isotopo  $^{12}\text{C}$  non subisce trasformazioni; in conseguenza di ciò, col passare del tempo, il rapporto  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  diminuisce e dalla misura di questo rapporto è possibile risalire all'età dei resti di un organismo o del fossile che da esso si è formato.

Questo metodo presenta un **inconveniente, legato al fatto che il rapporto fra gli isotopi del carbonio è cambiato nel tempo a causa di mutamenti avvenuti nell'atmosfera**. Basandoci sul rapporto  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  dell'atmosfera attuale, si rischierebbe di commettere errori, perciò si rende necessaria una calibrazione del metodo mediante l'analisi degli anelli di accrescimento di alberi (dendrocronologia; v. riquadro a p. 202), effettuato su esemplari ancora viventi ed estremamente vecchi, quelli di *Pinus aristata*, che raggiunge età di circa 5000 anni: si sono così ottenute curve di calibrazione per quasi tutti i materiali organici, applicabili fino a circa 70 000 anni. Circa i materiali di datazione assoluta di rocce e fossili, è opportuno tenere presente che:

- i minerali con elementi radioattivi sono in genere più abbondanti nelle rocce ignee, rispetto a quelle sedimentarie;
- dalla misurazione radiometrica si ottiene l'età di un elemento contenuto in un minerale, quindi le età radioattive sono riferite all'età dei singoli minerali;
- se in una roccia sono presenti minerali di età diversa, a causa della sua genesi, a seconda del minerale sottoposto ad analisi, si otterranno età diverse.

Inconvenienti del metodo del radiocarbonio

Datazione assoluta di rocce e fossili

**Tabella 16.1 Metodi di radiodatazione**

RADIO-NUCLIDI	PRODOTTO FINALE DEL DECADIMENTO	TEMPO DI DIMEZZAMENTO (ANNI)	INTERVALLO DI TEMPO (ANNI) VALIDO PER LA DATAZIONE
$^{87}\text{Rb}$	$^{87}\text{Sr}$	$1,47 \cdot 10^{10}$	$4,5 \cdot 10^9 - 10^8$
$^{232}\text{Th}$	$^{208}\text{Pb}$	$1,39 \cdot 10^{10}$	$4,5 \cdot 10^9 - 10^7$
$^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}$	$4,5 \cdot 10^9$	$4,5 \cdot 10^9 - 10^7$
$^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}$	$7,1 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^9 - 10^7$
$^{40}\text{K}$	$^{40}\text{Ar}$	$1,33 \cdot 10^9$	$4,5 \cdot 10^9 - 10^4$
$^{14}\text{C}$	$^{14}\text{N}$	$5,73 \cdot 10^3$	$\text{max } 40 \cdot 10^3$

Riassumiamo nella tab. 16.1 alcuni dei metodi di radiodatazione più utilizzati, indicando accanto a ciascuno il tempo di dimezzamento dell'elemento radioattivo e l'intervallo di tempo valido per la datazione.

## ALTRI METODI DI DATAZIONE ASSOLUTA

È possibile datare depositi lacustri e stabilire l'età di antiche piante rispettivamente con il metodo delle varve e della dendrocronologia (questi metodi permettono, tuttavia, di risalire al massimo a qualche migliaio di anni fa).

### Metodo delle varve

In Scandinavia, Canada ed Europa centrale sono presenti cave di argilla, caratterizzate da stratificazione che indica un particolare ritmo sedimentario. Alternativamente, si osserva uno strato più chiaro, a granulometria grossa (sabbie) e di maggior spessore (1 cm), depositatosi in estate, e uno strato più scuro (per la presenza di materiale organico), a granulometria più fine e di minor spessore (poco più di 1 mm), depositatosi in inverno: l'insieme di questi due strati costituisce una **varva**. Ogni varva indica un periodo di un anno, dunque il numero complessivo delle varve indica anche il tempo di formazione del deposito.

Si tratta di depositi periglaciali, cioè formati in laghi situati in vicinanza di ghiacciai e alimentati dalle acque di fusione dei ghiacciai stessi: il loro spessore può arrivare ad alcune decine di metri. Nei mesi estivi, a causa della forte ablazione glaciale, il materiale detritico sabbioso si forma in abbondanza; nei mesi invernali, al contrario, questa fonte di apporto detritico si blocca completamente e si deposita una fanghiglia organica, molto più fine; questi materiali si possono accumulare per migliaia di anni alla fronte dei ghiacciai. La scansione annua dei sedimenti permette di ricostruire la storia del deposito (basta, per esempio, contare il numero di strati scuri estivi per risalire all'età del deposito).

### Dendrocronologia

Il termine deriva dal greco *déndron*, albero e *chrónos*, tempo e indica un metodo di datazione assoluta basato sullo studio e sul conteggio degli anelli annuali di accrescimento degli alberi, che permettono non solo di risalire all'età dell'albero, ma anche di trarre indicazioni sulle variazioni climatiche avvenute in passato.

Lo spessore degli anelli e il diametro dei vasi conduttori in essi presenti dipendono, infatti, dalle condizioni climatiche della stagione in cui essi si formano: un maggior diametro dei vasi conduttori indica abbondante disponibilità di acqua, mentre un diametro minore dei vasi è indice di un clima più arido. Ogni stagione vegetativa determina l'accrescimento del diametro del fusto. Nella sezione trasversale di un tronco si osservano anelli annuali, ciascuno formato da una zona più chiara e larga, corrispondente al legno primaverile, e da una più scura e compatta, corrispondente al legno estivo. Per stabilire l'età di un albero senza abbatterlo, si può effettuare un carotaggio, cioè il prelievo di un sottile tassello di legno, corrispondente al raggio del tronco.

Dalla misurazione dello spessore dell'intera serie di anelli si possono correlare più piante di una stessa area e trarre indicazioni sulle variazioni climatiche. Il metodo è molto attendibile e in qualche caso utilissimo, in quanto ha un margine di errore inferiore a un anno, ma non lo si può di fatto utilizzare oltre i 10 000 anni fa (esso non è applicabile alle piante monocotiledoni come le palme, in cui non avviene un accrescimento in diametro del fusto, detto anche accrescimento secondario).

## 16.4 Le ere geologiche

Grazie ai metodi di datazione prima esposti, lo studio delle rocce e dei fossili ha permesso di individuare e di ordinare i fenomeni geologici e gli eventi biologici che hanno caratterizzato la storia della Terra, dalla sua origine fino a oggi, e di **suddividere i 4,6 miliardi di anni della Terra in lunghi intervalli di tempo.**

Più precisamente, la storia della Terra è stata suddivisa nelle seguenti categorie temporali, dalla più ampia alla più ristretta: **era, periodo, epoca ed età.** Le ere, i periodi e le epoche hanno nomi applicabili su scala mondiale; per le età, invece, esistono nomi differenti a seconda delle regioni.

La storia del nostro pianeta è stata suddivisa in cinque ere: l'era precambriana (o criptozoica), l'era primaria (o paleozoica), l'era secondaria (o mesozoica), l'era terziaria (o cenozoica) e l'era quaternaria (o neozoica), dalla più antica alla più recente, che a loro volta sono state suddivise in diversi periodi (tab. 16.2). Oggi però molti autori considerano l'era quaternaria non più come un'era, ma come un periodo dell'era terziaria.

Era, periodo, epoca, età

### ■ Era precambriana (Precambriano)

L'era **precambriana**, o **criptozoica**, ha una durata, circa 4 miliardi di anni, superiore a quella di tutte le altre ere geologiche. Essa comprende tre periodi il **Priscoano**, il più antico, l'**Archeano** e il **Proterozoico**.

Dopo la formazione della crosta terrestre, nel corso dell'era precambriana si verificarono cicli orogenetici, le cui tracce sono visibili solo in alcuni settori della crosta terrestre (scudo canadese, scudo baltico e scudo siberiano), che non hanno subito sensibili deformazioni nei periodi successivi, mentre in altre zone i corrugamenti risalenti a quest'era sono stati cancellati e mascherati dall'erosione e da successive orogenesi (ai cicli orogenetici avvenuti in quest'era è stato dato il nome di orogenesi huroniana, dal nome del lago Huron, nell'America Settentrionale).

Fenomeni geologici

Dal **punto di vista climatico**, l'era precambriana fu caratterizzata da notevoli oscillazioni della temperatura: sono stati infatti ritrovati sia depositi tipici di climi caldi, sia depositi glaciali, testimonianza di glaciazioni (periodi geologici caratterizzati da freddo intenso e notevole espansione dei ghiacciai). In particolare, nella regione dei Grandi Laghi dell'America settentrionale, del Canada, della Cina, della Groenlandia, dell'Australia e dell'Africa meridionale, sono state ritrovate antiche morene (depositi glaciali), le **tilliti**, formate da conglomerati a blocchi striati immersi in una ganga ar-

Andamento climatico

Le tilliti

**Tabella 16.2** Le ere geologiche

MILIONI DI ANNI FA	ERE	PERIODI (SISTEMI)	EPOCHE PRINCIPALI (SERIE)
4500	<b>precambriana (Precambriano)</b> , o <b>criptozoica</b> (dal greco <i>criptós</i> , segreto e <i>zōon</i> , animale: della vita nascosta)	<b>Priscoano</b> (dal latino <i>priscus</i> , antico, primitivo) <b>Archeano</b> (dal greco <i>arché</i> , principio)	<b>Ontariano</b> (da <i>Ontario</i> , lago dell'America Settentrionale) <b>Huroniano</b> (dal <i>Huron</i> , lago dell'America Settentrionale)
2500		<b>Proterozoico</b> (dal greco <i>próteros</i> , anteriore)	
590	<b>primaria (Primario)</b> , o <b>paleozoica</b> (dal greco <i>palaiós</i> , antico: della vita antica)	<b>Cambriano</b> (da <i>Cambria</i> , nome latino del Galles)	
500		<b>Ordoviciano</b> (da <i>Ordovices</i> , nome latino di una tribù celtica del Galles)	
438		<b>Siluriano</b> (da <i>Siluri</i> , nome latino di una tribù celtica del Galles)	
408		<b>Devoniano</b> (da <i>Devon</i> , contea inglese)	
360		<b>Carbonifero</b>	<b>Mississippiano</b> (da <i>Mississippi</i> , fiume degli USA) <b>Pennsylvaniano</b> (da <i>Pennsylvania</i> , stato degli USA)
286		<b>Permiano</b> (da <i>Perm</i> , nome di una provincia della Russia, negli Urali)	
250	<b>secondaria (Secondario)</b> , o <b>mesozoica</b> (dal greco <i>mésos</i> , medio: della vita di mezzo)	<b>Triassico</b> (dal greco <i>trías</i> , triade; nel periodo si distinguono, infatti, tre serie)	
210		<b>Giurassico</b> (da <i>Giura</i> , catena montuosa tra la Francia e la Svizzera)	
135		<b>Cretaceo</b> (dal latino <i>creta</i> , le rocce calcaree bianche tipiche di questo periodo)	
65	<b>terziaria (Terziario)</b> , o <b>cenozoica</b> (dal greco <i>kainós</i> , recente: della vita recente)	<b>Paleogene</b> o <b>Nummulitico</b> (caratteristica abbondanza di nummuliti, foraminiferi marini)	<b>Paleocene</b> (dal greco <i>palaiós</i> , antico e <i>kainós</i> , recente: recente antico)
57			<b>Eocene</b> (dal greco <i>eós</i> , aurora: recente, dell'alba)
36			<b>Oligocene</b> (dal greco <i>oligos</i> , poco: poco recente)
23			<b>Miocene</b> (dal greco <i>meion</i> , minore: meno recente)
6			<b>Pliocene</b> (dal greco <i>pléon</i> , più: più recente)
1,8	<b>quaternaria (Quaternario)</b> , o <b>neozoica</b> (dal greco <i>néos</i> , nuovo: della vita nuova)		<b>Pleistocene</b> (dal greco <i>pleistos</i> , moltissimo: moltissimo recente)
0,01			<b>Olocene</b> (dal greco <i>ólos</i> , tutto: recente del tutto)

**FENOMENI GEOLOGICI  
EVENTI BIOLOGICI**

si forma la crosta terrestre; le rocce più antiche sono di tipo basaltico, ricche di elementi leggeri (Si, K, Na, Ca) e come tali in grado di "galleggiare" sul mantello più pesante (con silicati di Fe e Mg); origine della vita (organismi unicellulari nel mare; tracce di alghe antiche di 3,5 miliardi di anni ritrovate in Australia in concrezioni stromatolitiche)

grandi cambiamenti di clima, da caldi intensi a epoche glaciali; atmosfera ricca di anidride carbonica; intensa attività vulcanica; alghe abbondanti, primi organismi animali (protozoi)

clima uniforme e terre probabilmente deserte; produzione di ossigeno per opera delle alghe marine; artropodi e altri invertebrati (trilobiti, Echinodermi, Brachiopodi, ecc.) di ambiente marino; aree continentali principali: Europa, Asia, Nordamerica, Gondwana (Sudamerica, Africa, India, Australia, Antartide)

clima uniforme, mari caldi, intensa attività vulcanica; l'atmosfera si arricchisce via via di ossigeno; comparsa dei vertebrati (pesci)

orogenesi caledoniana: collisione tra Nordamerica ed Europa (formazione della Laurentia); clima sempre caldo e uniforme; minore attività vulcanica; gran parte della terraferma è ancora desertica; vegetali e artropodi terrestri

mari caldi; si riduce la superficie degli oceani e si estende quella della terraferma; forte attività vulcanica; anfibi, ammoniti (cefalopodi), diffusione delle foreste

buona parte delle terre emerse si trova nella fascia tra i tropici, dove predominano condizioni climatiche miti e umide; si susseguono abbassamenti e innalzamenti delle aree costiere e si formano e si prosciugano sterminate lagune e paludi; si originano così depositi di sabbia e fanghi, che formano rocce arenacee, e depositi di vegetali, che, coperti da altri strati, carbonizzano; rettili; grandi foreste (dalla cui fossilizzazione ha origine il carbone)

orogenesi ercinica, che porta al sollevamento di catene montuose (Urali, Appalachi, rilievi dell'Europa centro-occidentale ecc.) in diverse regioni della Terra (dal nome della selva *Ercinia*, tra il Reno e l'alto Danubio); una grande glaciazione, iniziata nel Carbonifero, ricopre di ghiacci la parte meridionale dell'unico blocco delle terre emerse, un supercontinente chiamato Pangea; nella fascia equatoriale e tropicale il clima è caldo-umido; nella zona settentrionale è piuttosto secco e la temperatura è mite; alla fine del periodo, i ghiacci si ritirano; si estinguono le trilobiti

primo periodo dell'era mesozoica, con clima caldo e secco; numerose ed estese le zone desertiche, con vaste oasi; il clima diventa più umido verso la fine del periodo; comparsa dei dinosauri e dei primi mammiferi

il clima, mediamente, è stabile, moderato e umido; favorisce la diffusione dei vegetali e degli animali erbivori; gran parte dei mari sono caldi e ricchi di vita; cominciano a prendere forma gli attuali continenti: l'Australia, l'Antartide e l'America Meridionale si staccano dall'Africa; tra l'America Settentrionale, l'Europa e l'Africa inizia ad aprirsi l'Oceano Atlantico; prime avvisaglie dell'orogenesi alpina: movimenti delle zolle fanno sorgere le Ande e le Montagne Rocciose; l'America Settentrionale e l'Europa sono in parte coperte da mari poco profondi; dinosauri e altri rettili; primi uccelli; piante con fiori (angiosperme)

tutti i continenti attuali finalmente sono separati; l'Atlantico continua ad allargarsi; in tutti i continenti si estendono mari con bassi fondali; numerose anche le zone paludose; appartengono a questo periodo i più antichi sedimenti del fondale oceanico, formati dai resti di alghe ricche di carbonati e di foraminiferi divenuti un calcare bianco, compatto e duro, detto chalk; il clima è mite; vi sono tracce di glaciazioni; è il periodo dell'estinzione dei dinosauri e delle ammoniti

periodo molto caldo, con intensa attività vulcanica; l'India è ancora separata dall'Asia; l'Australia è unita all'Antartide; Europa e America Settentrionale sono unite all'estremo nord; notevole diversificazione dei mammiferi, comparsa dei primati

l'Europa e l'America Settentrionale si separano; l'Australia si separa dall'Antartide, dove si formano ghiacciai al livello del mare; l'orogenesi alpina è in pieno svolgimento: si sollevano le Alpi e le altre catene mediterranee

il clima tende a raffreddarsi; la glaciazione sottrae acqua agli oceani e il livello del mare raggiunge un minimo assoluto; si apre il Mar Rosso e si formano le fosse tettoniche africane; l'India si congiunge con l'Asia e la collisione dà il via alla fase principale della formazione delle catene himalaiane; affermazione di mammiferi e uccelli

il ghiaccio antartico continua ad aumentare ed entrambe le calotte polari sono più estese di quelle attuali; inizia la formazione delle Alpi; prosciugamento del Mediterraneo, apertura dello stretto di Gibilterra

il clima va raffreddandosi, e si preparano le alternanze caldo-freddo che daranno origine alle glaciazioni e alle deglaciazioni; continua il sollevamento delle Alpi; sviluppo degli Ominidi

ha inizio il periodo delle grandi glaciazioni, con avanzate delle calotte polari verso latitudini più basse e successivi periodi interglaciali; durante le glaciazioni, il livello dei mari si abbassa ed emergono parecchie zone, come il collegamento tra Asia Orientale e America Settentrionale; comparsa del genere *Homo* (*H. habilis*, *H. erectus*, *H. neanderthalensis*, *H. sapiens*); industrie umane e paleolitiche

l'epoca ha inizio con l'ultimo arretramento dei ghiacci verso le regioni polari; è l'epoca in cui viviamo; industrie umane mesolitiche e neolitiche

L'origine della vita

gillosa, che testimoniarebbero dunque la presenza di estesi ghiacciai.

Inoltre, in quest'era, circa 3,5 miliardi di anni fa, ebbe origine la vita (v. riquadro), come testimoniarebbero reperti fossili (soprattutto di organismi invertebrati marini) ritrovati in Australia, nel giacimento fossilifero di Ediacara.

## L'ORIGINE DELLA VITA SULLA TERRA

Secondo le ipotesi oggi più accreditate, la vita avrebbe avuto origine a partire da semplici composti chimici (origine abiotica della vita), che si sarebbero aggregati in forme via via più complesse. Le prime testimonianze fossili di forme viventi risalgono a circa 3,4 miliardi di anni fa, ma si ritiene probabile che la vita sia comparsa sulla Terra circa 3,6 miliardi di anni fa, quando le condizioni del pianeta erano molto diverse da quelle attuali: la Terra era ancora in via di consolidamento e di raffreddamento, la temperatura in superficie era molto elevata e l'atmosfera priva di ossigeno. Una prima ipotesi sulla formazione di molecole organiche fu avanzata, negli anni Venti, dal chimico russo A.I. **Oparin** (1894-1980) e dal biologo inglese J.B.S. **Haldane** (1892-1964). Essi ipotizzarono che l'atmosfera primitiva fosse composta da metano, ammoniac, idrogeno e vapore acqueo: sottoposti all'azione di scariche elettriche atmosferiche e alle radiazioni solari, i gas dell'atmosfera primordiale avrebbero originato le prime biomolecole all'interno di raccolte d'acqua ad alta temperatura, che costituivano il cosiddetto **brodo primordiale**. Queste prime biomolecole si sarebbero successivamente aggregate spontaneamente in forme più complesse, chiamate **coacervati**. L'ipotesi formulata da Oparin e Aldane trovò una conferma sperimentale 30 anni più tardi a opera dello statunitense S. Miller (1930), che ideò un'apparecchiatura nella quale i gas presenti nell'atmosfera primordiale venivano sottoposti a scariche elettriche in assenza di ossigeno: nell'apparecchiatura si formarono diverse molecole organiche, tra le quali alcuni amminoacidi. Secondo alcuni

scienziati, probabilmente l'aggregazione degli amminoacidi a formare catene simili alle proteine fu facilitata dalle superfici argillose della Terra, ancora in via di raffreddamento.

Altri esperimenti condotti negli anni Cinquanta da S. Fox e altri biologi statunitensi, permisero di comprendere come, dai **primi amminoacidi** si sia potuta evolvere una struttura simile a una cellula, per composizione e per funzioni. In particolare, riscaldando gli amminoacidi in assenza di ossigeno, si formano spontaneamente dei **polipeptidi**, una breve catena proteica, che, messi in acqua, danno origine a piccole vescicole; queste manifestano una debole attività enzimatica e sono in grado di accumulare certe sostanze dalla soluzione circostante, dando luogo, in alcuni casi, alla formazione sulla propria superficie di una pellicola di lipidi e proteine, dotata di proprietà tipiche delle membrane cellulari. Resta tuttavia da chiarire come da queste strutture "simili a cellule" si siano potute evolvere le cellule che noi oggi conosciamo, capaci di autoreplicarsi, in particolare come abbiano potuto formarsi DNA e RNA (le molecole che dirigono la riproduzione cellulare e che si formano solo da molecole analoghe, che funzionano da stampo).

Pare comunque accertato che le **prime cellule** fossero **procariote eterotrofe**, che si nutrivano di sostanze organiche già presenti nell'ambiente e ricavano l'energia necessaria al loro mantenimento grazie a processi di fermentazione. Da queste prime forme, riconducibili agli attuali batteri, si sarebbero poi evolute le **cellule eucariote**.

## ■ Era primaria

L'era **primaria**, o **paleozoica**, comprende sei periodi: **Cambriano**, **Ordoviciano**, **Siluriano**, **Devoniano**, **Carbonifero** e **Permiano**.

All'inizio dell'era primaria, durante il Cambriano, le aree continentali erano suddivise in due grandi blocchi chiamati Gondwana (comprendente Sudamerica, Africa, Australia, Antartide e India) e Laurasia (comprendente Asia, Europa e Nordamerica), che si riunirono successivamente nel supercontinente chiamato Pangea, destinato poi a fratturarsi nuovamente (v. a p. 146).

L'era primaria si caratterizza per due successivi cicli orogenetici: l'**orogenesi caledoniana** (da Caledonia, nome anticamente attribuito alla Scozia), avvenuta nel periodo Siluriano, che ha coinvolto l'Inghilterra del nord, la Norvegia, la Siberia, la Groenlandia e parte dell'Africa e dell'Australia orientale, e l'**orogenesi ercinica** (da silva Ercinia, nome che i romani attribuivano alla zona compresa tra il fiume Reno e l'alto Danubio), avvenuta durante il Carbonifero e il Permiano, che sollevò le catene montuose dell'Inghilterra meridionale, dell'Europa centrale (Vosgi, Ardenne, Massiccio Centrale francese e la Foresta Nera) e, al di fuori dell'Europa, gli Urali, i monti Altai (Asia centrale), la catena dell'Atlante, i monti di Città del Capo (Africa) e i monti Appalachi (America del nord).

Ciascuno dei sei periodi in cui è stata suddivisa l'era primaria è caratterizzato da **variazioni climatiche** e da particolari forme di vita, che sono riassunte nella tab. 16.2; si sottolineano di seguito alcuni eventi di particolare importanza.

Grazie alla comparsa dello strato di ozono nell'atmosfera, e alla protezione da esso esercitata nei confronti di radiazioni solari dannose per gli esseri viventi (v. a p. 210), a partire dal Siluriano la vita vegetale ebbe un grande sviluppo prima nei mari e poi anche sulla terraferma e raggiunse il massimo sviluppo nel **Carbonifero**, periodo in cui si formarono lussureggianti foreste, con piante d'alto fusto, di cui rimane traccia negli attuali depositi di carbone (v. a p. 118).

Relativamente agli organismi animali, il Paleozoico può essere considerato l'**era dei trilobiti** (crostacei con il corpo diviso longitudinalmente in tre lobi, che dominarono soprattutto il Cambriano) e dei **graptoliti** (piccoli organismi che vivevano in colonie e diffusi in tutti gli oceani, abbondantissimi nell'Ordoviciano), per quanto riguarda gli invertebrati, e l'**era dei pesci** (la cui grande espansione si ebbe soprattutto nel Devoniano), per quanto riguarda i vertebrati. I **primi rettili**, comparsi nel Carbonifero, si diversificarono notevol-

La formazione di Pangea

Orogenesi caledoniana ed ercinica

Lo sviluppo della vita vegetale

Gli organismi animali



## L'ESTINZIONE DEI GRANDI RETTILI

L'era secondaria, o mesozoica, è anche nota come "era dei grandi rettili", perché essi vissero numerosi in ogni continente, per 150 milioni di anni, indiscussi dominatori del regno animale: tuttavia, si estinsero 65 milioni di anni fa, alla fine del Cretaceo, e ancora misteriose rimangono le cause che ne provocarono la scomparsa.

Varie discipline, dalla paleontologia all'astrofisica, cercano di spiegare l'estinzione dei grandi rettili avanzando numerose ipotesi: di seguito ne esponiamo alcune tra le più accreditate.

Secondo una prima ipotesi, l'estinzione dei grandi rettili sarebbe stata causata dalla caduta sulla Terra di un gigantesco **meteorite**. A sostegno di questa ipotesi esistono diverse prove, tra cui la presenza insolitamente elevata dell'iridio (elemento raramente rintracciabile nella crosta terrestre, ma abbondante, invece, in meteoriti e asteroidi) in campioni di argille databili a quel periodo e tracce di un gigantesco cratere (circa 190 km di diametro), formatosi per impatto con un meteorite, rinvenute nello Yucatan del nord (Centro

America). Circa le conseguenze di questo catastrofico impatto, alcuni studiosi sostengono che esso avrebbe provocato una tempesta di fuoco su tutto il pianeta (in Danimarca e in Nuova Zelanda sono state ritrovate anche elevate quantità di carbonio, prodotto della combustione, in strati rocciosi contenenti notevoli quantità di iridio); altri scienziati affermano che la caduta del meteorite provocò un'onda di maremoto alta 100 m; altri ancora ipotizzano che l'impatto abbia sollevato polveri che avrebbero causato piogge acide torrenziali sufficientemente violente da provocare la morte di molte specie animali e vegetali all'istante; infine, alcuni scienziati ritengono che, in seguito all'esplosione del meteorite, miliardi di chilometri quadrati di basamento roccioso si siano ridotti in polvere: nuvole di polvere alternate a fumo avrebbero poi velato il Sole e lasciato il pianeta nella più fredda oscurità; le piante avrebbero smesso di produrre ossigeno e la vita si sarebbe lentamente arrestata (alla fine del Cretaceo quasi l'80% delle piante si è estinto).

### Estinzioni di specie animali

mente nel Permiano, preannunciando il loro grande sviluppo nell'era successiva. **Numerose estinzioni di specie animali** (trilobiti, alcune specie di molluschi e di altri invertebrati) caratterizzarono l'ultimo periodo dell'era primaria, il Permiano, (tanto che si parla di "grande estinzione permiana").

Si suppone che il clima, per un certo periodo di tempo, sia stato, nell'emisfero boreale, analogo a quello tropicale: ne sono testimonianza i fossili di *Pecopteris*; a essi si contrappongono fossili di specie vegetali di climi freddi, quali *Glossopteris*; nel Carbonifero e Permiano si hanno indizi di un clima umido, con frequenti tracce di un'imponente glaciazione.

### ■ Era secondaria

L'era **secondaria** è detta anche **mesozoica**, che significa "era di mezzo", in relazione al fatto che le specie vegetali e animali che la caratterizzano rappresentano una transizione tra quelle più primitive dell'era primaria e quelle dell'era terziaria. L'era secondaria comprende tre periodi: **Triassico**, **Giurassico** e **Cretaceo**.

Molti paleontologi propendono per un'altra ipotesi. Pur ammettendo che, con tutta probabilità, un meteorite abbia colpito veramente la Terra circa 65 milioni di anni fa, questo evento, tuttavia, non rappresenterebbe la causa dell'estinzione dei grandi rettili, che, anzi, già da 6 milioni di anni sarebbero stati in via di estinzione; inoltre, se il meteorite fosse stato abbastanza grande da uccidere i grandi rettili, avrebbe dovuto sterminare anche tutti gli animali più piccoli.

Secondo questi paleontologi, i grandi rettili subirono probabilmente fasi alterne di scomparsa e presenza dalla faccia della Terra durante tutto l'arco di tempo in cui abitarono il pianeta e non solo alla fine dell'era secondaria. L'origine del problema è da ricercare più indietro nel tempo, quando il supercontinente Pangea iniziò a frammentarsi e masse di terra a emergere, con formazione di **ponti terrestri** che univano i continenti precedentemente isolati: gli animali poterono spostarsi, i grandi rettili migrarono da un continente a un altro, portando con sé **malattie epidemiche**. Tut-

tavia, anche questa ipotesi lascia insoluti alcuni dubbi, poiché fatti analoghi si sono verificati più volte nella storia della Terra senza essere accompagnati da estinzioni. Altre considerazioni si aggiungono a quelle fatte finora e complicano ulteriormente il quadro: alcuni paleontologi hanno da sempre ipotizzato che i grandi rettili potessero vivere solo in climi tropicali, ma il ritrovamento di fossili di dinosauri anche in zone fredde cancella questa ipotesi. Si deve quindi escludere che i grandi rettili siano stati disturbati dal raffreddamento del clima conseguente all'impatto con un meteorite, poiché le specie che già vivevano in regioni fredde avrebbero dovuto sopravvivere, cosa che non si verificò. Ben lungi dall'aver completamente chiarito il mistero, l'estinzione dei grandi rettili è probabilmente da attribuire a un insieme di più fattori sfavorevoli, tra i quali l'insorgere di epidemie e lenti mutamenti del clima; una cosa, comunque, appare certa: senza l'estinzione dei grandi rettili la vita sulla Terra avrebbe sicuramente seguito un corso totalmente diverso.

Nel **Triassico** il continente Pangea comincia a frammentarsi e si forma il nuovo oceano Atlantico (lo smembramento completo della Pangea culminerà nel Cretaceo). Nell'era secondaria l'attività orogenetica in Europa è meno intensa rispetto al Paleozoico; in America si assiste al sollevamento delle Ande e di parte delle Montagne Rocciose.

La varietà degli organismi si accresce notevolmente: in particolare, nel Mesozoico si assiste alla diffusione dei **grandi rettili**, i **dinosauri**, che conquistano tutti gli ambienti: terrestri (con brontosauri, diplodochi, tirannosauri), marini (con ittiosauri e plesiosauri) e aerei (con *Pterodactylus* e *Archeopteryx*). Altri organismi esclusivi dell'era secondaria sono le **ammoniti** e le **belemniti** (entrambe molluschi cefalopodi), che scompaiono prima della fine dell'era, insieme ai grandi rettili (v. riquadro). Compagno, inoltre, le **prime specie di uccelli** e di **mammiferi**. Quanto ai vegetali, nel Triassico le piante erano rappresentate soprattutto da felci arboree, sostituite poi dalle gimnosperme, mentre nel Giurassico **compaiono le angiosperme** (le piante con fiori), che ebbero grande diffusione nel Cretaceo.

Frammentazione di Pangea e orogenesi

Gli organismi viventi

### ■ Era terziaria

L'era terziaria, o **cenozoica**, è suddivisa in cinque periodi: **Paleocene**, **Eocene**, **Oligocene**, **Miocene** e **Pliocene**.

I fenomeni geologici

**Imponente è l'attività orogenetica**, a cui si deve la formazione delle maggiori catene montuose attuali (orogenesi alpino-himalayana), movimenti orogenetici che continueranno anche nell'era successiva. All'inizio dell'era, la **distribuzione delle terre emerse** e dei mari corrisponde a quella attuale: l'oceano Atlantico si è allargato, l'Africa e l'India si sono spostate verso il margine meridionale dell'Eurasia, provocando il sollevamento della catena alpino-himalayana; il mare Tetide si chiude per il progressivo avvicinarsi dell'Africa all'Europa.

L'era dei mammiferi

Nell'era terziaria si assiste alla comparsa e allo sviluppo di gruppi vegetali e animali che popolano oggi la superficie terrestre. Con la scomparsa dei grandi rettili alla fine dell'era mesozoica, si affermano e si diffondono i mammiferi, tanto che il Cenozoico è considerato "l'**era dei mammiferi**"; tra i mammiferi si differenziano i **primati**, che, inizialmente adattati alla vita arboricola, assumono le sembianze simili a quelle delle scimmie attuali. Sempre tra gli organismi animali, è da ricordare la comparsa dei nummuliti, foraminiferi a guscio calcareo grandi come monete che vivevano in mari poco profondi e tanto diffusi da dare il nome alla prima parte dell'era, (periodo Nummulitico, o Paleogene).

Il clima cambia gradualmente da tropicale a temperato, con punte temperato-fredde alla fine dell'era.

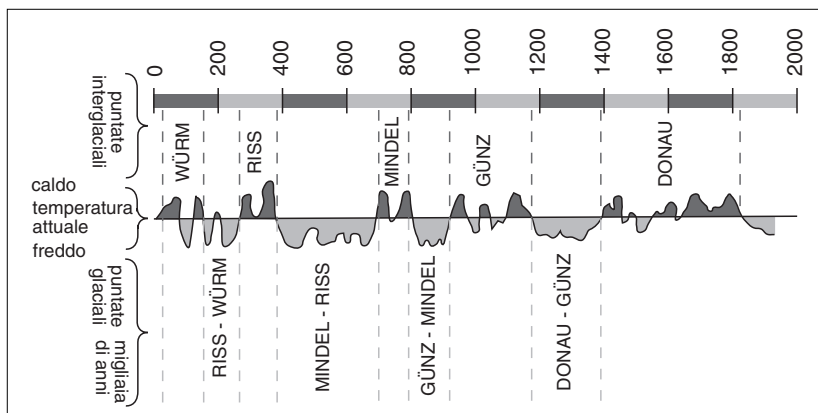
### ■ Era quaternaria

L'ultima era geologica, quella attuale, è detta **quaternaria**, o **neozoica**, cioè "della vita nuova", poiché flora e fauna sono costituite da piante e animali tuttora viventi. L'era quaternaria viene divisa in due periodi: **Pleistocene** e **Olocene**.

L'era delle grandi glaciazioni

Nell'era quaternaria continuano, anche se attenuati, i movimenti delle fasi finali dell'orogenesi alpino-himalayana. Ma ciò che soprattutto caratterizza quest'era è l'alternarsi di periodi freddi e di periodi caldi, che causarono l'**avvicinarsi di grandi glaciazioni** (con estensione delle calotte polari a latitudini più basse) e di **periodi interglaciali** (periodi in cui si riduce l'estensione dei ghiacciai).

Per l'**area alpina**, sono state individuate **cinque grandi glaciazioni**, (dette Donau, Günz, Mindel, Riss e Würm, dalla più antica alla più recente), intervallate da quattro periodi interglaciali (fig. 16.2). Il ritiro dei ghiacciai non fu regolare e continuo, ma caratterizzato da soste e limitati avanzamenti. L'espansione e la contrazione delle calotte glaciali provocò



**Figura 16.2**  
Glaciazioni e periodi  
interglaciali  
nell'era neozoica.

**variazioni di livello dei mari:** durante le glaciazioni il livello marino si abbassa sensibilmente (**regressioni marine**), a causa delle enormi quantità d'acqua ammassate sui continenti sotto forma di ghiaccio; al contrario, durante i periodi interglaciali la fusione dei ghiacciai provoca l'innalzamento del livello dei mari (**trasgressioni marine**). L'alternarsi delle glaciazioni e dei periodi interglaciali ha avuto grande influenza anche sulla distribuzione degli esseri viventi sul pianeta: in particolare, alle nostre latitudini si sono succedute specie proprie di climi tropicali a specie tipiche di zone a clima più freddo. Tra gli eventi biologici che hanno caratterizzato l'era quaternaria si deve segnalare soprattutto la “rapida” **evoluzione e diffusione sul pianeta del genere *Homo***.

La distribuzione  
dei viventi

## GLOSSARIO

### **Datazione radiometrica**

Metodo di datazione assoluta, che consente di attribuire l'età a una roccia in base all'analisi di isotopi radioattivi in essa contenuti.

### **Era geologica**

Ciascuno dei cinque lunghi intervalli di tempo in cui è stata suddivisa l'età della Terra, in base a criteri stratigrafici, litologici e paleontologici; risulta a sua volta suddivisa in un certo numero di periodi.

### **Fossile**

Ogni resto o traccia di un antico organismo animale o vegetale vissuto in passato e giunto fino a noi grazie all'azione di particolari processi fisici e chimici.

### **Fossili guida**

Fossili di animali e vegetali vissuti per un periodo di tempo relativamente breve e con un'ampia diffusione geografica; permettono di stabilire l'età dello strato roccioso nel quale sono contenuti.

## GLOSSARIO

**Isotopi**

Atomi di uno stesso elemento che possiedono un differente numero di neutroni nel nucleo (e quindi diverso numero di massa); spesso un elemento si presenta in natura come due o più isotopi, che in certi casi sono radioattivi.

**Paleontologia**

Scienza che studia gli organismi animali e vegetali antichi attraverso l'analisi dei fossili.

**Tempo di dimezzamento**

Intervallo di tempo necessario perché la metà dei nuclei di un isotopo radioattivo si trasformi in un isotopo stabile dello stesso elemento o in un altro elemento, attraverso il decadimento radioattivo.

**Varva**

Sedimento detritico di ambiente lacustre periglaciale, formato da uno strato chiaro di sabbie alternato a uno strato scuro di argille e deposto nel periodo di un anno.

## TEST DI VERIFICA

- 1 La cronologia relativa:**
- a** stabilisce l'età in anni di un particolare evento;
  - b** stabilisce la sequenza di particolari eventi;
  - c** permette di datare precisamente solo l'evento più recente;
  - d** utilizza il metodo della dendrocronologia.

- 2 Quale tra i seguenti non è un metodo di datazione assoluta:**
- a** dendrocronologia;
  - b** metodo delle varve;
  - c** radiometria;
  - d** metodo stratigrafico.

- 3 La scienza che studia i fossili è detta:**
- a** geologia storica;
  - b** paleontologia;
  - c** radiometria;
  - d** carbonatazione.

- 4 L'estinzione dei grandi rettili avvenne nell'era:**
- a** criptozoica;
  - b** paleozoica;
  - c** mesozoica;
  - d** cenozoica.

- 5 Quale delle seguenti orogenesi si è verificata nell'era cenozoica?**
- a** huroniana;
  - b** paleozoica;
  - c** alpino-himalayana;
  - d** caledoniana.

R

1. b 2. d 3. b 4. c 5. c

# 17 Atmosfera

---

La Terra è avvolta dall'**atmosfera**, un involucro gassoso costituito da una miscela di gas, tra cui **l'azoto**, **l'ossigeno** e il diossido di carbonio, o **anidride carbonica**; essa svolge importanti funzioni, sia nei confronti dell'ambiente fisico terrestre (contribuendo, per esempio, a modellarlo attraverso i fenomeni meteorologici che in essa si verificano), sia nei confronti degli organismi viventi (l'ossigeno e il diossido di carbonio sono importanti gas respiratori).

**In origine**, l'atmosfera aveva una **composizione diversa dall'attuale**, che è andata modificandosi nel tempo e ancora oggi subisce cambiamenti, soprattutto a opera dell'attività dell'uomo.

In relazione all'andamento della temperatura col variare della quota, **l'atmosfera viene suddivisa in cinque fasce: troposfera, stratosfera, mesosfera, termosfera ed esosfera**, ciascuna caratterizzata da particolari fenomeni.

La **temperatura**, la **pressione** e l'**umidità**, che caratterizzano la troposfera, determinano importanti fenomeni meteorologici, quali i **venti** e le **precipitazioni**, e sono all'origine delle **perturbazioni atmosferiche**.

## 17.1 La composizione chimica dell'atmosfera

La superficie terrestre si trova immersa in una miscela di gas che chiamiamo **aria** e che avvolge la Terra come un involucro, al quale si dà il nome di **atmosfera** (dal greco *atmós*, vapore).

L'atmosfera odierna è composta per circa i 4/5 da azoto ( $N_2$ ) e per circa 1/5 da ossigeno ( $O_2$ ), accanto a numerosi altri componenti minori, tra cui principalmente argo (Ar), vapore acqueo ( $H_2O$ ) e diossido di carbonio, o anidride carbonica ( $CO_2$ ) (tab. 17.1). I gas vengono trattiene intorno al pianeta dalla forza di gravità e circa il 99% della loro massa si trova nei primi 40 km di altezza, mentre a quote superiori diventa sempre più rarefatta.

Oltre ai gas citati, nell'atmosfera sono presenti anche numerosi tipi di particelle solide finissime, costituite da ceneri vulcaniche, spore di funghi e batteri, granuli di polline, fuliggine (proveniente da processi di combustione), che nel loro insieme costituiscono il **pulviscolo atmosferico**.

Inoltre, la combustione di rilevanti quantità di combustibili fossili libera nell'aria, oltre a diossido di carbonio, anche al-

Composizione chimica

Pulviscolo atmosferico

Inquinamento atmosferico

**Tabella 17.1** Composizione dell'atmosfera\*

GAS	% IN VOLUME
azoto (N <sub>2</sub> )	78,084
ossigeno (O <sub>2</sub> )	20,947
argo (Ar)	0,934
vapore acqueo (H <sub>2</sub> O)	0,33
diossido di carbonio (CO <sub>2</sub> )	0,032
neo (Ne)	0,001818
elio (He)	0,000524
metano (CH <sub>4</sub> )	0,0002
idrogeno (H <sub>2</sub> )	0,00005
cripto (Kr)	0,0000114
xeno (Xe)	0,0000087
ozono (O <sub>3</sub> )	0,000004
ossidi di azoto (monossido, NO; diossido, NO <sub>2</sub> ; protossido, N <sub>2</sub> O)	} tracce
monossido di carbonio (CO)	
ammoniaca (NH <sub>3</sub> )	
diossido di zolfo (SO <sub>2</sub> )	
solfuro di idrogeno (H <sub>2</sub> S)	

\* a livello del suolo

tre sostanze gassose, quali monossido di carbonio, diossido di zolfo, o anidride solforosa, e ossidi di azoto: la quantità di queste sostanze nell'atmosfera è andata aumentando rapidamente nel corso del '900, contribuendo ad aggravare il fenomeno dell'**inquinamento atmosferico** (e a intensificare l'effetto serra ascrivibile al CO<sub>2</sub>).

In relazione alla composizione chimica, l'atmosfera viene suddivisa in due grandi fasce:

Omosfera

● l'**ommosfera**, o bassa atmosfera, da 0 a 100 km di quota, in cui la composizione chimica dell'aria è relativamente costante, a causa dei continui rimescolamenti a cui è sottoposta;

Eterosfera

● l'**eterosfera**, o alta atmosfera, oltre i 100 km di quota, in cui i gas, molto rarefatti, si dispongono a strati in base alla loro densità (per cui la composizione chimica dell'aria non è uniforme).

Funzioni dell'atmosfera

Tra le **numeroso funzioni svolte dall'atmosfera** nei confronti della superficie terrestre e degli organismi che su di essa vivono, ne elenchiamo qui alcune, rimandando ai paragrafi successivi e ad altri capitoli per una loro dettagliata descrizione. L'atmosfera:

- contribuisce a regolare la temperatura media terrestre;
- è sede dei fenomeni meteorologici;

- contribuisce al modellamento della superficie terrestre;
- filtra le radiazioni solari;
- fa da scudo contro l'ingresso di meteoriti;
- permette la vita grazie alla presenza dell'ossigeno e del diossido di carbonio.

## 17.2 Origine ed evoluzione dell'atmosfera

Sembra ormai certo che **ai primordi della storia della Terra la composizione dell'atmosfera differisse da quella attuale**: in essa abbondavano gas leggeri come l'idrogeno ( $H_2$ ) e l'elio (He), oggi presenti in piccolissime quantità; probabilmente essa contava anche rilevanti quantità di metano ( $CH_4$ ), ammoniac ( $NH_3$ ) e azoto ( $N_2$ ). La perdita dei gas più leggeri deve essere avvenuta a causa della temperatura presente allora sulla superficie terrestre, che, essendo molto più elevata di quella attuale, poteva conferire a tali componenti un'energia sufficiente a vincere la forza di gravità e potersi così disperdere nello spazio.

L'atmosfera primordiale deve poi aver subito dei cambiamenti ed essersi evoluta fino alla composizione attuale, a causa sia di fenomeni geologici, sia di particolari eventi biologici.

In particolare, in seguito ai **violenti impatti di meteoriti** col nostro pianeta e alle **eruzioni vulcaniche** via via sempre più frequenti, l'atmosfera si sarebbe arricchita di gas liberati dall'interno della Terra. **Alcuni componenti** dell'atmosfera attuale sarebbero, invece, il **prodotto di reazioni chimiche**: ciò spiegherebbe la presenza di azoto, diossido di carbonio e vapore acqueo nelle quantità attuali. L'**ossigeno**, invece, all'inizio potrebbe essersi formato, in piccole quantità, in seguito alla **scomposizione del vapore acqueo sotto l'azione di scariche elettriche**, oltre che per l'**azione della radiazione solare nell'alta atmosfera**; dopo la comparsa della vita sul pianeta, l'atmosfera si è arricchita di **ossigeno, prodotto dalle piante** come conseguenza della fotosintesi clorofilliana.

La conversione fotochimica, cioè operata dalla luce, dell'ossigeno diede origine alla formazione dello "**strato**" di **ozono**, fondamentale per la protezione delle forme di vita dalle radiazioni solari ultraviolette. Per condensazione del vapore acqueo in acqua piovana, nel corso di milioni di anni, si originarono gli oceani.

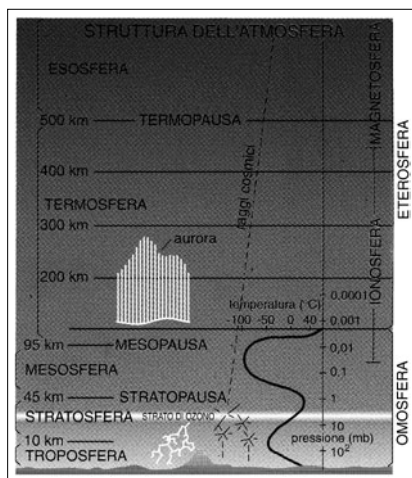
Ben lungi dall'essere stabile, l'**evoluzione dell'atmosfera continua anche oggi** e, negli ultimi secoli, la sua composizione ha subito dei cambiamenti soprattutto a causa di gas prodotti dall'attività umana, che provocano squilibri termici e problemi di inquinamento atmosferico a livello planetario.

L'atmosfera  
primordiale

Cause endogene,  
esogene  
e biologiche  
dell'evoluzione  
dell'atmosfera

Un'evoluzione in atto



**Figura 17.1**

La suddivisione dell'atmosfera in base ai valori di temperatura e alla composizione chimica.

### 17.3 La suddivisione dell'atmosfera

In base all'andamento della temperatura con l'aumentare della quota, lo spessore dell'atmosfera viene suddiviso in cinque strati, che andando dal basso verso l'alto sono: la **troposfera**, la **stratosfera**, la **mesosfera**, la **termosfera** e l'**esosfera**; il passaggio da uno strato all'altro avviene attraverso sottili "fasce di transizione", dette rispettivamente **tropopausa**, **stratopausa**, **mesopausa** e **termopausa** (fig. 17.1).

#### ■ La troposfera

La **troposfera** (dal greco *trópos*, rivolgimento, mutamento) è lo strato più basso dell'atmosfera e si estende fino a circa 10-18 km dal suolo (lo spessore varia con la latitudine: è minore ai poli e maggiore all'Equatore). In essa si concentrano i 3/4 della massa dell'intera atmosfera e quasi tutto il vapore acqueo atmosferico e inoltre hanno sede i fenomeni meteorologici e anche i principali cicli biogeochimici che consentono gli scambi circolari di elementi e composti essenziali alla vita tra l'ambiente fisico e l'insieme degli esseri viventi (biosfera).

Le caratteristiche fondamentali della troposfera sono così riassumibili:

- **costanza della composizione chimica**, dovuta ai moti orizzontali e verticali dell'aria, che assicurano il continuo rimescolamento dei gas costituenti;

Costanza  
della composizione  
chimica

● **diminuzione della temperatura con l'altezza**, dovuta al fatto che l'atmosfera è riscaldata dal calore emesso dalla superficie terrestre. A livello del suolo la temperatura media annua è di 15 °C; mediamente, la diminuzione di temperatura avviene secondo un gradiente di 6,5 °C/km (gradiente geotermico verticale):

Diminuzione della temperatura

● **diminuzione della pressione atmosferica con l'aumentare dell'altezza**, dovuta al fatto che, andando verso l'alto, l'altezza della colonna d'aria sovrastante diventa via via minore (inoltre, negli strati superiori l'atmosfera è sempre più rarefatta);

Diminuzione della pressione

● **presenza della quasi totalità dell'acqua contenuta nell'atmosfera**; il vapore acqueo contenuto nella troposfera proviene dall'evaporazione degli oceani e delle acque continentali, oltre che dalla traspirazione degli organismi viventi, e si concentra nei primi 4 km di altitudine (dove ne sono presenti circa i tre quarti).

Vapore acqueo

La fascia di transizione tra troposfera e stratosfera è la **tropopausa**, caratterizzata dalla presenza di correnti aeree ad alta velocità (200-300 km/h), dette **correnti a getto**, veri e propri "fiumi d'aria" che si spostano stagionalmente in latitudine e in altezza e che talvolta circondano come un'unica fascia tutto il globo.

Tropopausa

## ■ La stratosfera

Si estende da 10-18 a 45 km di quota. Nella stratosfera la **temperatura** resta inizialmente quasi costante a circa - 55 °C sino a 20 km di altezza, poi risale lentamente fino a 0 °C al suo limite superiore, dove inizia la **stratopausa**, che separa la stratosfera dalla mesosfera.

Stratopausa

Il vapore acqueo è molto scarso, ma non totalmente assente: infatti, talvolta si possono osservare, tra i 20 e i 30 km, nubi sorprendentemente iridescenti, o madreperlacee.

Vapore acqueo

L'innalzamento della temperatura nell'alta stratosfera, tra i 17 e i 45 km, è dovuto sostanzialmente alla presenza di **ozono**, la cui molecola è formata da tre atomi di ossigeno, ossigeno triatomico (O<sub>3</sub>), e che raggiunge la sua massima concentrazione in uno strato compreso tra 20 e 30 km a cui si dà il nome di **ozonofera**. Questo strato è molto importante per tutti gli organismi viventi, in quanto l'ozono assorbe quasi completamente la porzione più pericolosa per gli organismi viventi dei raggi ultravioletti solari (v. riquadro a p. 210). La decomposizione che subisce l'ozono per azione dei raggi ultravioletti è associata a sviluppo di calore e ciò spiega il rapido aumento della temperatura nella stratosfera.

Temperatura

Ozonofera

## L'OZONOSFERA E IL BUCO NELL'OZONO

L'**ozono**, ( $O_3$ ), è un gas tossico, di colore bluastro e dal caratteristico odore acre, particolarmente concentrato nell'ozonosfera, dove si forma dall'ossigeno biatomico, ( $O_2$ ), per azione dei raggi ultravioletti (UV) provenienti dal Sole, con lunghezza d'onda inferiore a 300 nanometri. L'ozonosfera svolge un'importante funzione protettiva nei confronti della vita sulla Terra, poiché crea un'efficace **barriera contro i raggi ultravioletti**, che hanno effetto cancerogeno e possono provocare mutazioni. Tuttavia, l'integrità dell'ozonosfera è minacciata da una serie di sostanze provenienti dall'attività umana e il problema della diminuzione dello strato di ozono, comunemente noto come **buco nell'ozono**, costituisce uno dei più importanti aspetti dell'inquinamento atmosferico su scala planetaria, anche se il fenomeno è più evidente sulle regioni polari. Tra i responsabili della diminuzione di ozono stratosferico, vi sono i **clorofluorocar-**

**buri (CFC)**, composti chimici organici contenenti cloro e fluoro, impiegati sia come fluidi refrigeranti nell'industria del freddo, sia come propellenti nelle bombole di aerosol. Il largo utilizzo di queste sostanze, soprattutto negli anni Sessanta e Settanta, ne ha determinato l'accumulo nell'atmosfera e la diffusione verso la stratosfera, dove l'azione della radiazioni UV li scompone e provoca la liberazione del cloro atomico, che, attraverso una complessa serie di reazioni, reagisce con l'ozono trasformandolo in ossigeno; il cloro è molto stabile e un solo atomo può distruggere fino a 100 000 molecole di ozono prima di diventare inattivo.

Essendo stata accertata l'influenza dei CFC sulla diminuzione dell'ozono stratosferico, e note le conseguenze di ciò sull'ambiente e sugli esseri viventi, sono stati sottoscritti numerosi accordi internazionali per la messa al bando dei CFC e per l'impiego di sostituti meno dannosi per l'ozono.

### ■ La mesosfera

Forte diminuzione  
della temperatura

Si estende da 45 a 95 km di quota ed è caratterizzata da una **forte diminuzione di temperatura** che, al limite superiore, raggiunge valori compresi tra i - 70 e i - 90 °C. Nella mesosfera, per attrito, si incendiano le meteoriti provenienti dallo spazio, che formano scie luminose, chiamate popolarmente **stelle cadenti**.

Ionosfera

Nella mesosfera inizia una fascia caratterizzata dalla presenza di particelle dotate di cariche elettriche (ioni), detta **ionosfera**, che si estende tra gli 80 e i 500 km di quota (e che sconfina quindi nella termosfera): gli ioni si formano per azione di radiazioni provenienti dallo spazio (raggi cosmici) sui gas atmosferici.

Mesopausa

Con la **mesopausa**, che segna il confine tra mesosfera e termosfera, cessa la diminuzione di temperatura e si ha un'inversione di tendenza molto marcata.

### ■ La termosfera

Forte aumento  
della temperatura

Si estende da 95 a 500 km ed è così chiamata poiché la **temperatura riprende ad aumentare**, raggiungendo i 1000 °C a 300 km e valori straordinariamente elevati a quote maggiori (i valori di temperatura vanno intesi come misura del-

l'energia cinetica assai elevata delle poche molecole gassose presenti a quelle quote).

I gas sono ionizzati o allo stato atomico; mancano completamente diossido di carbonio, vapore acqueo e ozono.

Nella termosfera si verificano importanti fenomeni elettrici e geomagnetici, tra cui le **aurore polari**: si tratta di fenomeni luminosi, che si manifestano con maggior frequenza nelle zone polari, sotto forma di archi e raggi multicolori che cambiano rapidamente forma e colore e si originano quando elettroni e protoni provenienti dal Sole colpiscono ad alta velocità le particelle ionizzate presenti nell'alta atmosfera terrestre.

Aurore polari

La termosfera è sede degli **strati ionizzati a maggior densità elettronica della ionosfera**. Questi strati ionizzati riflettono le onde radio (tra i 60 e gli 80 km vengono riflesse le onde lunghe, tra i 90 e i 120 le onde medie, tra i 200 e i 250 le onde corte, tra i 400 e i 500 le onde cortissime).

Strati ionizzati

Lo strato di separazione tra termosfera ed esosfera è chiamato **termopausa**; in esso termina l'aumento di temperatura.

Termopausa

## ■ L'esosfera

È la **zona al di sopra dei 500 km**, nella quale la temperatura si considera costante. Al di sopra della termosfera, si possono verificare fughe di particelle dell'atmosfera verso lo spazio esterno; essa rappresenta una fascia di transizione in cui si mescolano particelle provenienti dalla Terra con altre di provenienza solare. **Fa da confine con il vuoto cosmico** e per l'estrema e progressiva rarefazione non è possibile stabilire con precisione un limite superiore.

Confine con il vuoto cosmico

Inoltre, la zona che si estende al di sopra dei 500 km di quota viene anche chiamata **magnetosfera**: è la zona in cui gli ioni sono così rari da avere scarsissime possibilità di urtarsi, per cui la loro vita media è sufficientemente lunga da risentire gli effetti del campo magnetico terrestre; la magnetosfera interagisce con il vento solare, che la comprime conferendole una caratteristica forma a goccia.

Magnetosfera

## 17.4 La temperatura dell'aria nella troposfera

Lo strato dell'atmosfera in cui si svolgono i fenomeni meteorologici (venti e precipitazioni) e climatici e che influenza più direttamente la vita sulla Terra è la **troposfera**: per questo motivo verrà preso ora in considerazione questo strato, analizzandone i fattori da cui dipendono i fenomeni prima menzionati. Tali fattori comprendono la temperatura (di cui

Assorbimento  
e dispersione  
dell'energia solare

ci occuperemo di seguito), la pressione (v. par. 17.5) e l'umidità (par. 17.6).

**La temperatura dell'aria nella troposfera diminuisce all'aumentare della distanza dal suolo:** infatti, la Terra riceve una quantità di onde "corte" provenienti dal Sole, le assorbe, si riscalda ed emette a sua volta radiazioni a lunghezza d'onda maggiore, che vengono indicate come **onde "lunghe"** e sono **note anche col nome di raggi infrarossi (IR)**. **Il vapore acqueo e soprattutto il diossido di carbonio** contenuti nell'atmosfera **assorbono e rimandano solo in parte** verso lo spazio **tali onde lunghe**, che in gran parte vengono invece riflesse verso la superficie terrestre: così, essi svolgono un ruolo decisivo nel mantenere in prossimità del suolo una temperatura mite, sufficiente per l'esistenza degli organismi viventi. Questo fenomeno è il cosiddetto **effetto serra** (v. riquadro).

Temperatura  
e latitudine

Oltre all'altitudine, molti altri fattori influenzano la temperatura dell'aria nella troposfera, quali la latitudine, la posizione delle terre e dei mari, il tipo di terreno e la vegetazione.

**La temperatura media diminuisce all'aumentare della latitudine**, poiché con essa diminuisce l'inclinazione dei raggi solari sulla superficie terrestre (v. cap. 5).

La temperatura delle zone costiere è più fresca in estate e più mite in inverno rispetto a quella di regioni dell'entroterra e ciò dipende dal fatto che **l'acqua ha una capacità termica maggiore della terraferma**, cioè richiede una maggiore quantità di calore per manifestare lo stesso aumento di temperatura: quindi, durante l'estate, la temperatura dell'acqua cresce meno rapidamente di quella della terraferma e ciò contribuisce a rendere la temperatura più fresca; viceversa, in inverno, il raffreddamento dell'acqua avviene meno rapidamente, contribuendo a mantenere la temperatura più mite rispetto all'entroterra.

L'albedo

In base alla sua composizione chimica, il suolo può riflettere una diversa quantità della radiazione solare ricevuta e dunque influenzare la temperatura a livello locale: si chiama **albedo** la capacità della superficie terrestre di riflettere la luce solare e viene espressa dalla percentuale di luce riflessa sul totale della luce ricevuta. I valori più alti di albedo si hanno per la neve fresca (80-90%), mentre per i suoli coltivati il valore scende a 15-20%.

La temperatura diminuisce in presenza di vegetazione, perché essa influisce sul valore dell'albedo, ma anche perché aumenta il contenuto di vapore acqueo nell'atmosfera a causa della traspirazione.

I termometri

Lo strumento per la misura della temperatura atmosferica utilizzato nelle stazioni meteorologiche è il **termometro a**

## L'EFFETTO SERRA

Con il termine “effetto serra” si indica un fenomeno che consiste nel riscaldamento dell'atmosfera terrestre: esso è dovuto al fatto che l'energia emessa dalla superficie terrestre, soprattutto sotto forma di raggi infrarossi (IR), per bilanciare il flusso di energia ricevuta dal Sole, viene parzialmente assorbita da alcuni gas presenti nell'atmosfera, detti gas-serra, soprattutto vapore acqueo e diossido di carbonio ( $\text{CO}_2$ ), e da questi nuovamente irradiata verso la Terra. In questo modo la temperatura media sulla superficie terrestre, di circa  $15^\circ\text{C}$ , è maggiore a quella che si avrebbe in assenza di atmosfera (sulla Luna, dove manca l'atmosfera, la temperatura media è di circa  $-18^\circ\text{C}$ ).

Questo fenomeno, del tutto naturale, sta tuttavia intensificandosi a causa dell'attività umana, che immette nell'atmosfera quantità sempre maggiori di gas-serra, che, secondo un'ipotesi non condivisa da tutti gli scienziati, provocherebbero un aumento della temperatura media terrestre. Le società moderne, soprattutto a partire dalla rivoluzione industriale, per produrre energia sono ricorse alla combustione di combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturali), particolarmente ricchi di carbonio, che nel processo di combustione si combina con l'ossigeno atmosferico formando  $\text{CO}_2$ , la cui concentrazione è aumentata sensibilmente, passando nell'ultimo secolo da 270 parti per milione (ppm) a 366 ppm; l'aumento di  $\text{CO}_2$ , è in parte attribuito anche alla deforestazione,

che provoca una riduzione dell'attività fotosintetica delle piante, nella quale si consuma  $\text{CO}_2$ .

Altri gas-serra, in gran parte legati all'attività umana, sono il metano, il protossido di azoto e i clorofluorocarburi.

Se l'immissione di  $\text{CO}_2$  nell'atmosfera dovesse proseguire secondo la tendenza degli ultimi 30 anni, si prevede un raddoppio della sua concentrazione, rispetto a quella attuale, tra circa un secolo. Tuttavia, tenendo conto anche dell'azione esercitata dagli altri gas, si ipotizza che possano crearsi condizioni equivalenti a un raddoppio di  $\text{CO}_2$  con un anticipo di circa mezzo secolo. L'aumento di temperatura conseguente a questo raddoppio viene stimato dell'ordine dei  $2^\circ\text{C}$  a livello globale terrestre. Come conseguenza dell'aumento della temperatura media, si prevede una parziale fusione dei ghiacci polari (che comunque avverrebbe nell'arco di secoli), un graduale innalzamento del livello dei mari e la sommersione dei territori costieri. L'aumento di temperatura, tuttavia, comporterebbe anche un'intensificazione del tasso di evaporazione dell'acqua dalla superficie terrestre e un probabile aumento della nuvolosità, che ridurrebbe la radiazione solare che raggiunge la superficie terrestre, compensando in parte l'effetto serra. Le previsioni, ricavabili mediante modelli matematici, non sono ancora universalmente accettate, in quanto basate su una conoscenza tuttora parziale della dinamica dell'atmosfera terrestre.

**mercurio.** L'unità di misura della temperatura in meteorologia (la scienza che studia il tempo atmosferico) è il grado centigrado, o Celsius (simbolo  $^\circ\text{C}$ ). Il termometro deve essere collocato in modo tale che non venga influenzato da altro calore che non sia quello direttamente fornitogli dall'aria e per tale motivo lo si pone a un'altezza di circa due metri dal suolo; le stazioni meteorologiche sono anche dotate di **termometri di massima e di minima** (che permettono di leggere, in qualsiasi momento della giornata, le temperature minima e massima registrate) e di **termografi**, strumenti

Escursione termica	<p>che registrano su un diagramma le temperature misurate in momenti diversi.</p> <p>Di particolare interesse per i meteorologi sono le temperature minima e massima diurne, che si registrano rispettivamente all'alba e verso le ore 15, le temperature medie (diurna, mensile e annua), l'<b>escursione termica</b>, cioè la differenza tra la temperatura minima e massima registrate nell'arco di una giornata, di un mese o di un anno (escursione termica diurna, mensile e annuale).</p>
Isoterme	<p>È possibile rappresentare su una carta geografica la distribuzione della temperatura (giornaliera, mensile o annuale) mediante le <b>isoterme</b>, linee immaginarie che uniscono tutti i punti aventi uguale temperatura media, riferita a livello del mare, in un certo intervallo di tempo (giorno, mese o anno).</p>

## 17.5 La pressione atmosferica

Pressione e altitudine	<p>La pressione atmosferica equivale al peso di una colonna d'aria alta quanto l'atmosfera su una superficie di 1 cm<sup>2</sup>; a livello del mare, a 45° di latitudine e a 0 °C, essa è pari alla pressione che esercita una colonna di mercurio (Hg) alta 760 mm e della sezione di 1 cm<sup>2</sup>: si dice, perciò, che vale 760 mm Hg.</p> <p>La pressione atmosferica varia in rapporto all'altitudine, alla temperatura e all'umidità dell'aria.</p> <p><b>La pressione diminuisce all'aumentare dell'altitudine</b> perché in corrispondenza diminuisce sia l'altezza della colonna d'aria sovrastante, sia la densità dell'aria (v. par. 17.1).</p>
Pressione e temperatura	<p><b>La pressione diminuisce all'aumentare della temperatura</b> perché, riscaldandosi, l'aria si dilata, diventa meno densa e quindi più leggera. Per questo motivo, le masse d'aria calda hanno una pressione più bassa di quelle d'aria fredda, pertanto le prime tendono a salire, le seconde a scendere verso il basso.</p>
Pressione e umidità	<p><b>La pressione diminuisce all'aumentare dell'umidità atmosferica</b>, cioè del suo contenuto di vapore acqueo, in quanto quest'ultima ha una densità minore dell'ossigeno e dell'azoto, i gas presenti in maggior quantità nell'atmosfera. Pertanto, l'aria umida è più leggera dell'aria secca e tende a salire verso l'alto, mentre la seconda tende a scendere verso il basso.</p>
Isobare	<p>È possibile rappresentare su una carta geografica la distribuzione della pressione atmosferica mediante le <b>isobare</b>, linee concentriche che uniscono tutti i punti caratterizzati da uguale pressione atmosferica, al livello del mare e alla temperatura di 0 °C. Le isobare delimitano aree di pressione più alta da aree di pressione più bassa.</p>

Un'area di alta pressione è detta **area anticiclonica**: in essa l'aria è più densa e tende quindi a spostarsi verso il basso e a dirigersi verso le zone di bassa pressione circostanti. Un'area di bassa pressione è detta **area ciclonica**: in essa l'aria è meno densa e tende quindi a spostarsi verso l'alto, convergendo verso il centro.

Aree anticicloniche  
e aree cicloniche

La pressione atmosferica è misurata attraverso i **barometri**. Esistono **barometri a mercurio**, analoghi al dispositivo ideato nel 1643 da E. Torricelli (1608-1647), costituito da un tubo di vetro alto 1 m e della sezione di 1 cm<sup>2</sup>, chiuso a una estremità, riempito di mercurio e capovolto in una vaschetta pure contenente mercurio: all'interno del tubo, la colonna di mercurio si abbassa finché viene raggiunto l'equilibrio tra la sua forza peso e la pressione atmosferica che grava sulla superficie libera del mercurio contenuto nella vaschetta. Si usano anche **barometri aneroidi**, costituiti da una capsula metallica nella quale è stato praticato il vuoto, contenente una molla. La pressione atmosferica fa deformare la capsula, mentre la molla, solidamente fissata alla capsula, è collegata a un indice scorrevole su un quadrante tarato secondo la scala delle unità di misura richieste.

I barometri

L'**unità di misura** della pressione del Sistema Internazionale è il **pascal** (Pa); altre unità sono: l'**atmosfera** (atm), che corrisponde a 760 mm Hg, il **bar** e un suo sottomultiplo, il **millibar** (mb). Il valore medio della pressione a livello del mare è fissato a 1 atm (760 mm Hg), corrispondenti a 1013 mb e a 10, 13 Pa.

Unità di misura

## 17.6 L'umidità atmosferica

Per **umidità atmosferica** s'intende la **quantità di vapore acqueo contenuto nell'aria** e che proviene dall'evaporazione dell'acqua dalla superficie terrestre per azione della radiazione solare e anche, in piccole quantità, dalla traspirazione delle piante.

Il vapore acqueo ha un ruolo importantissimo nell'atmosfera, perché, come vedremo in seguito, dalla sua condensazione si formano le nubi, la nebbia e hanno origine le precipitazioni. Il vapore acqueo contenuto nell'atmosfera può essere espresso come **umidità assoluta** e **umidità relativa**.

L'**umidità assoluta** indica i grammi di vapore acqueo contenuti in 1 metro cubo di aria.

Umidità assoluta

L'**umidità relativa** (UR) rappresenta il rapporto percentuale tra la quantità effettiva di vapore acqueo presente nell'aria e la massima quantità che, alla medesima temperatura, sarebbe necessaria perché l'aria fosse satura di vapore acqueo. In-

Umidità relativa



fatti, per ogni valore di temperatura dell'aria, esiste una quantità massima di vapore acqueo che può essere contenuta allo stato aeriforme: superata questa quantità, il resto del vapore acqueo condensa in goccioline di acqua allo stato liquido o, se la temperatura è uguale o minore di 0 °C, sublima in piccoli cristalli di ghiaccio. Quando il vapore acqueo contenuto nell'aria comincia a condensare, si dice che l'aria è satura di vapore acqueo. Un valore di UR pari, per esempio, al 70% significa che l'aria contiene il 70% del vapore acqueo che, a una data temperatura, la renderebbe satura; un valore di UR pari al 100% indica, invece, che l'aria è satura e, se la temperatura si abbassa o se altro vapore si aggiunge, il vapore presente in eccesso condensa. Il valore dell'umidità relativa dipende dalla temperatura dell'aria: all'aumentare della temperatura, aumenta la quantità di vapore acqueo necessaria perché l'aria sia satura; viceversa, se la temperatura è bassa, una minor quantità di vapore acqueo sarà sufficiente per saturare l'aria.

Gli igrometri

Gli strumenti impiegati per la misura dell'umidità dell'aria si chiamano **igrometri**, di cui esistono diversi tipi: il più diffuso è l'igrometro a capello, il cui funzionamento sfrutta la proprietà dei capelli di allungarsi all'aumentare dell'umidità relativa dell'aria e di accorciarsi al diminuire della medesima. In un igrometro a capello, un fascio di capelli, tesi non tirati, è fissato a un'estremità, mentre l'altra estremità è fissata a un sistema di amplificazione che comanda un indice di riferimento su una scala graduata.

## 17.7 I venti

Le differenze di pressione atmosferica che si registrano tra zone diverse della superficie terrestre sono responsabili della formazione dei venti.

**I venti sono masse d'aria che si spostano orizzontalmente sulla superficie terrestre, da zone di pressione maggiore verso zone di pressione minore.**

Come si originano i venti

Come si è detto nel paragrafo 17.5, quanto più alta è la pressione tanto più pesante è l'aria: in un'area di alta pressione (anticiclonica) le masse d'aria che si trovano al centro, più dense e più pesanti, tendono a dirigersi verso la periferia; mentre in un'area di bassa pressione (ciclonica), l'aria al centro è più leggera e viene sollevata da quella più pesante delle aree vicine. Poiché le zone anticicloniche e cicloniche sono adiacenti, al suolo si verifica uno spostamento di aria dalle aree anticicloniche verso quelle cicloniche.

La forza che origina un vento è chiamata **forza di gradiente** ed è direttamente proporzionale al **gradiente barico**, cioè

## LA FORZA DI CORIOLIS

I venti non si spostano in linea retta, compiendo il tragitto più breve, che è quello che taglia perpendicolarmente le isobare, ma, a causa della rotazione terrestre, deviano verso destra nell'emisfero boreale e verso sinistra nell'emisfero australe.

Nelle 24 ore (durata del moto di rotazione) un punto che si trova al polo compie una rotazione completa su se stesso di  $360^\circ$ , senza però spostarsi. Un punto all'Equatore, nello stesso periodo compie a sua volta una rotazione di  $360^\circ$ , ma percorre un tragitto di circa 40 000 km (lunghezza dell'Equatore): un punto all'Equatore ha la stessa velocità angolare che al polo, ma ha anche una velocità lineare pari a circa 40 000 km al giorno. Spostandosi dai poli all'Equatore, la velocità lineare dei punti via via presi in considerazione aumenta.

Una massa d'aria in movimento da uno dei due poli verso l'Equatore, procedendo verso le latitudini più basse, dove la velocità lineare è più alta, si trova in ritardo rispetto a quella che sarebbe stata la sua posizione se la Terra non ruotasse su se stessa. Viceversa, un vento che spira dall'Equatore verso i poli, quindi da zone a maggior velocità lineare verso altre a velocità minore, "anticipa" il movimento di rotazione della Terra.

Il fenomeno determina una deviazione dei venti rispetto al moto rettilineo. Il senso della deviazione, che dipende dal senso della rotazione, cambia a seconda dell'emisfero, ed è espresso dalla **legge di Ferrel**: un corpo libero di muoversi sulla superficie terrestre devia verso destra nell'emisfero boreale e verso sinistra in quello australe.

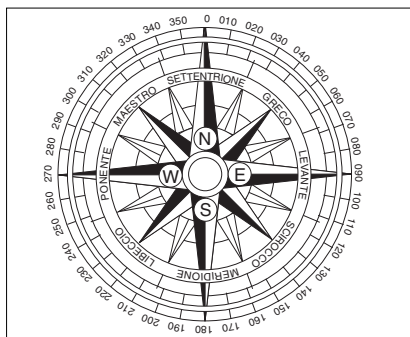
al rapporto tra la differenza di pressione fra due punti della Terra e la loro distanza.

I venti, come qualsiasi altro corpo che si muove liberamente su una superficie ruotante, non si spostano in linea retta, ma subiscono una deviazione, verso destra nell'emisfero boreale e verso sinistra nell'emisfero australe, dovuta alla **forza di Coriolis** (v. riquadro).

Caratteri distintivi di un vento sono:

- la **direzione**, che è sempre quella di provenienza e viene indicata in gradi sessagesimali partendo dal Nord; sono in uso anche le denominazioni fornite dalla rosa dei venti (fig. 17.2).

Caratteri distintivi di un vento



**Figura 17.2**

La rosa dei venti: in essa è possibile leggere la denominazione di alcuni venti in base alla loro direzione.

**Tabella 17.2** Scala Beaufort\*

GRADO	VELOCITÀ (KM/H)	TIPO DI VENTO	CARATTERI INDICATIVI
0	0-1	calma	il fumo ascende verticalmente; il mare è uno "specchio"
1	2-5	bava di vento	il vento devia il fumo; increspature dell'acqua
2	6-11	brezza leggera	le foglie si muovono, una girandola ordinaria è messa in moto; onde piccole, ma evidenti
3	12-19	brezza	foglie e rametti costantemente agitati, il vento dispiega le piccole bandiere; piccole onde, creste che cominciano a infrangersi
4	20-28	brezza vivace	il vento solleva polvere, foglie secche, foglietti di carta, i rami sono agitati; piccole onde che divengono più lunghe
5	29-38	brezza tesa	gli arbusti con foglie cominciano a oscillare; nelle acque interne si formano piccole onde con creste; onde moderate, allungate
6	39-49	vento fresco	grandi rami agitati, i fili telegrafici fanno udire un sibilo; si formano marosi con creste di schiuma bianca, generalmente con spruzzi
7	50-61	vento forte	alberi interi agitati, difficoltà a camminare contro vento; il mare è grosso, la schiuma comincia a essere sfilacciata in scie
8	62-74	burrasca moderata	rami spezzati, camminare contro vento è impossibile; marosi di altezza media e più allungati, dalle loro creste si distaccano turbini di spruzzi
9	75-88	burrasca forte	camini e tegole asportati; grosse ondate, spesse scie di schiuma e di spruzzi sollevate dal vento possono ridurre la visibilità
10	89-102	tempesta	rara in terraferma; alberi radicati, gravi danni alle abitazioni; enormi ondate con lunghe creste a pennacchio
11	103-117	fortunale	si verifica raramente; gravissime devastazioni; onde enormi e alte, che talvolta possono nascondere navi di medio tonnellaggio; visibilità ridotta
12	oltre 118	uragano (o ciclone)	sulla terraferma distruzione di edifici, manufatti ecc.; in mare l'aria piena di schiuma e di spruzzi porta a visibilità assai ridotta

\* velocità del vento a un'altezza standard di 10 m su un terreno piatto

- la **velocità**, che si esprime in km/h o in nodi (1 nodo = 1,852 km/h); si misura con uno strumento detto **anemometro** e viene indicata dalla **scala di Beaufort**, che comprende valori da 0 a 12, con velocità crescenti (tab. 17.2); la velocità di un vento dipende dal gradiente barico: maggiore è il gradiente barico, maggiore sarà la velocità del vento.

### ■ Classificazione dei venti

In base al loro regime, cioè alla presenza o meno di variazioni nella direzione in cui spirano, i venti si classificano in:

- **costanti**, quando spirano tutto l'anno sempre nella stessa direzione e nello stesso senso (per esempio, gli alisei);
- **periodici**, se periodicamente invertono il senso in cui spirano; possono essere a periodo stagionale (monsoni) o a periodo diurno (brezze) (v. riquadro);

Costanti

Periodici

- **variabili** o **locali**, se soffiano irregolarmente nelle zone temperate tutte le volte che si vengono a formare aree cicloniche o anticicloniche (scirocco, föhn, bora); Variabili, o locali
- **irregolari** o **ciclonici**, se sono caratterizzati da movimento vorticoso che conferisce loro una violenza distruttiva; prendono nomi diversi a seconda delle località: **uragani** nelle Antille e sulle coste americane dell'Atlantico, **tifoni** nel Mar Giallo e nelle Filippine, **tornado** nelle grandi pianure degli USA e dell'Australia (tab. 17.3). Irregolari, o ciclonici

## 17.8 La circolazione generale dell'aria nell'atmosfera

A causa della sfericità terrestre e dell'inclinazione dell'asse di rotazione, le basse latitudini vengono riscaldate più dei poli, poiché, a causa del maggiore angolo di incidenza, i raggi solari si distribuiscono ai poli su una superficie molto più

### I VENTI PERIODICI: MONSONI E BREZZE

I venti sono detti periodici se invertono periodicamente il senso in cui spirano: ciò può accadere quando le condizioni della pressione atmosferica cambiano, per cui si crea una zona di alta pressione dove prima c'era una zona di bassa pressione e viceversa.

Esempi di venti periodici sono i **monsoni** (periodicità stagionale) e le **brezze** (periodicità diurna).

I **monsoni** sono venti caratteristici dell'oceano Indiano e dei mari della Cina. Essi soffiano, durante il semestre estivo (aprile-ottobre), dall'oceano (su cui si crea una zona di alta pressione) verso l'India e il Sud-est asiatico (su cui insiste una zona di bassa pressione); durante i mesi invernali (novembre-marzo), dall'India (zona di alta pressione) verso l'oceano (zona di bassa pressione). I monsoni sono causati da un grande spostamento latitudinale della zona di bassa pressione equatoriale (10° di latitudine sud in inverno e i 10° di latitudine nord in estate). Ciò stabilisce un flusso d'aria polare dal settore nord durante l'inverno e un flusso d'aria equatoriale marittima da sud durante l'estate. La regione climatica investita dai monsoni è

molto eterogenea, a causa principalmente della situazione orografica: l'India, protetta dall'Himalaya, è poco soggetta in inverno a invasioni di aria polare; in estate i monsoni portano sull'India l'umidità raccolta per evaporazione dal mare e sono quindi apportatori di abbondanti piogge utili all'agricoltura, fondamentali per la vita nell'Asia meridionale.

Le **brezze** sono venti periodici che spirano in prossimità delle coste, invertendo la loro direzione nell'arco di un giorno. Durante il dì, periodo di luce, gli strati d'aria che stanno sopra la terraferma si riscaldano più rapidamente rispetto a quelli sopra al mare (la capacità termica della terraferma è più bassa di quella dell'acqua): ciò determina una zona di alta pressione sul mare e di bassa pressione sulla terraferma e il movimento dell'aria dal mare verso terra, che costituisce la brezza di mare. Durante la notte, il raffreddamento della terraferma per irraggiamento di calore è rapido e gli strati d'aria inferiori diventano più freddi di quelli sopra l'acqua: l'alta pressione si stabilisce sopra la terraferma e l'aria si muove ora da terra verso il mare, causando la brezza di terra.

**Tabella 17.3** Classificazione dei venti

CLASSE	NOME	CARATTERISTICHE
<b>costanti</b> (venti che soffiano tutto l'anno, sempre nella stessa direzione e nello stesso senso)	<b>alisei</b> (dal francese <i>alizé</i> )	spirano nelle zone fra l'Equatore e i tropici: da nord-est a sud-ovest nell'emisfero boreale, da sud-est a nord-ovest nell'emisfero australe; si generano nelle zone anticicloniche tropicali, e convergono verso le zone equatoriali
	<b>venti extratropicali</b>	spirano nelle fasce equatoriali dove, per effetto del riscaldamento, si formano masse di aria calda e umida ascendenti
	<b>venti occidentali</b>	spirano fra i 35° e i 60°, in corrispondenza delle zone temperate: da sud-ovest a nord-est nell'emisfero boreale, da nord-ovest a sud-est nell'emisfero australe; sono i venti regolari delle zone temperate
<b>periodici</b> (venti che invertono periodicamente il senso; possono essere a periodo stagionale, come i monsoni o gli etesi, o a periodo diurno, come le brezze)	<b>monsoni</b> (dall'arabo <i>mausim</i> , stagione)	sono sistemi di venti caratteristici dell'oceano Indiano e dei mari della Cina; soffiano, durante il semestre estivo (aprile-ottobre), dall'oceano (anticiclone) verso terra (India e Asia nordorientale, aree cicloniche); durante i mesi invernali (novembre-aprile), dall'India verso l'oceano (Africa orientale)
	<b>etesi</b> (dal greco <i>étos</i> , anno)	spirano, durante l'estate, dal Mare Egeo all'Egitto, e in senso opposto durante l'inverno
	<b>brezze</b>	venti moderati a periodo diurno; si distinguono in: <i>brezze di mare e di terra</i> : soffiano, durante il dì, dal mare alla costa, durante la notte, dalla costa al mare; <i>brezze di monte e di valle</i> : soffiano, durante il dì, dalla valle alla montagna, durante la notte, dalla montagna alla valle; <i>brezze di lago e di riva</i> : si comportano come le brezze di mare e di terra
<b>variabili o locali</b> (venti che soffiano irregolarmente nelle zone temperate tutte le volte che si vengono a formare aree cicloniche o anticicloniche)	<b>scirocco</b> (dall'arabo <i>shulūq</i> , vento di mezzogiorno)	vento caldo che nasce nel deserto del Sahara; procedendo da sud-ovest verso nord, si carica di umidità sul Mediterraneo e raggiunge, umido e violento, l'Europa
	<b>mistral</b> (dall'antico provenzale <i>maestral</i> )	vento assai freddo, che spira dal Massiccio Centrale francese e raggiunge la massima violenza nella vallata del Rodano
	<b>föhn, o favonio</b> (dal latino <i>favonius</i> , da <i>favēre</i> , far crescere)	vento caldo e secco, che soffia soprattutto in primavera e in autunno nelle vallate alpine verso l'Austria e la Svizzera e talvolta raggiunge la pianura Padana

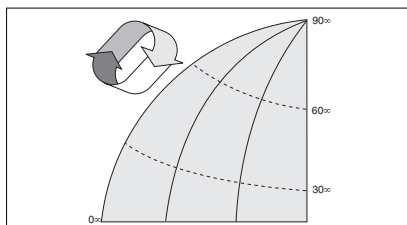
estesa (v. cap. 5). La differenza di riscaldamento fra i poli e l'Equatore produce una differenza di temperatura, che l'atmosfera tende a riequilibrare attraverso il movimento delle masse d'aria dall'Equatore verso i poli (v. riquadro a p. 223). Supponendo la Terra immobile (non dotata di moto di rotazione intorno al suo asse) e con distribuzione regolare dei continenti e degli oceani, si avrebbe una circolazione dell'aria nella troposfera, limitatamente alla parte esposta ai raggi del Sole e per quanto riguarda l'emisfero nord, come indicato in figura 17.3. Questa circolazione ideale d'aria determina la formazione di una cella nota come **cella di Hadley**, così chiamata in onore dello scienziato inglese G. Hadley (1685-1768), che nel 1735 tentò di spiegare per la prima

La circolazione ideale

**Tabella 17.3** Classificazione dei venti

CLASSE	NOME	CARATTERISTICHE
<b>variabili o locali</b> (segue)	<b>ghibli</b> (dall'arabo <i>qibli</i> , meridionale)	vento del deserto, molto caldo e carico di sabbia, che soffia per una trentina di giorni l'anno soprattutto sui territori della Tunisia, della Libia e dell'Egitto
	<b>khamasin</b> (dall'arabo <i>khamasin</i> , 50)	vento caldo e secco che spira da sud, da aprile a giugno, sul delta del Nilo; dura da 3 a 5 giorni
	<b>harmattan</b> (dal sudanese <i>haamētā'n</i> )	vento caldo, secco e molto violento, che spira da nord-est, in inverno e in primavera, nell'Africa occidentale
	<b>bora</b> (dal greco <i>boréas</i> , nord)	vento freddo e violento che spira dai monti Illirici, nell'ex Jugoslavia, verso le coste dell'Istria e della Dalmazia, in inverno
	<b>austro</b> (dal latino <i>auster</i> , vento da sud, ostro)	vento caldo che spira da sud
	<b>grecale</b> (dal tardo latino <i>Graecalis</i> , dei Greci)	vento che soffia da nord-est a sud-ovest sul Mediterraneo centrale e meridionale nelle stagioni fredde
	<b>maestrale</b> (da <i>maestro</i> , inteso come principale)	vento da nord-ovest; è uno dei venti predominanti Mediterraneo
	<b>tramontana</b> (dal latino <i>trans montanus</i> , al di là dei monti)	vento freddo, spesso violento, che spira da nord, in inverno, e può investire tutta la penisola italiana
	<b>libeccio</b> (da <i>Libycos</i> , proveniente dalla Libia)	vento da ovest o da sud-ovest, violento in tutte le stagioni; soffia sulla Corsica e sull'Italia tirrenica
	<b>chinook</b> (dal nome di una tribù pellerossa del nord-ovest degli USA)	vento caldo e asciutto che soffia da nord-ovest, sulle Montagne Rocciose (USA), prevalentemente in primavera e in autunno
	<b>pampero</b> (da <i>pampa</i> )	vento freddo e umido che spira da ovest, tra luglio e settembre, soprattutto sul Rio de la Plata (Argentina)
<b>irregolari o ciclonici</b>	<b>cicloni</b>	vengono così genericamente definiti i venti irregolari, violentissimi e distruttivi, dotati di movimento vorticoso; essi prendono nomi diversi secondo le località: <i>uragani</i> (dall'amerindio <i>huracanes</i> ) nelle Antille e sulle coste americane dell'Atlantico; <i>tifoni</i> (dal cinese <i>t'ai fung</i> , vento violento) nel Mar Giallo e nelle Filippine; <i>tornados</i> (dallo spagnolo <i>tornado</i> , derivato da <i>torno</i> , giro, vortice) nelle grandi pianure degli USA e in Australia

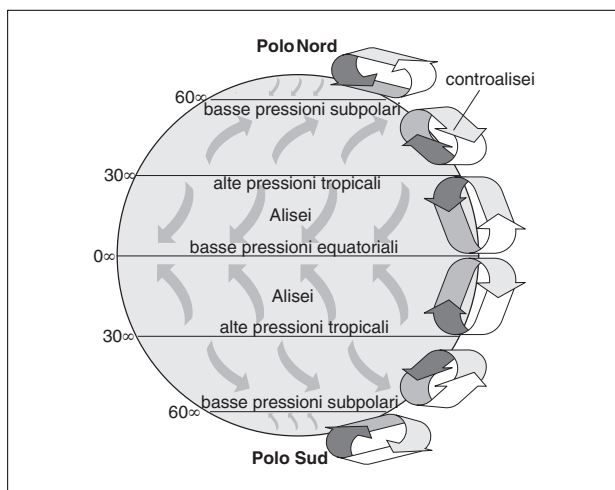
**Figura 17.3**  
La circolazione ideale dell'aria nella bassa troposfera.



volta i fenomeni atmosferici su scala planetaria. A causa del riscaldamento solare, all'Equatore si generano correnti ascendenti di aria calda, che salgono a quote elevate sem-

**Figura 17.4**

La circolazione generale dell'aria nella bassa troposfera.



pre nella troposfera, dove divergono verso il Polo Nord e verso il Polo Sud, seguendo l'andamento dei meridiani. Spostandosi verso i poli, le correnti d'aria si raffreddano sempre più, fino a che chiudono il ciclo della circolazione ritornando verso l'Equatore come correnti fredde.

Tuttavia, la rotazione terrestre introduce nella circolazione ideale dell'aria ora descritta una notevole modifica, dovuta anche alla disomogenea distribuzione di continenti e oceani (fig. 17.4).

Sulle **regioni equatoriali**, a causa di correnti ascendenti verticali che si generano sulla regione maggiormente riscaldata del pianeta, si trova una zona di bassa pressione, nota anche come **calma equatoriale**, tanto temuta ai tempi della navigazione a vela, poiché la mancanza di venti poteva bloccare per lunghi periodi la navigazione.

A nord e a sud di questa zona spirano gli **alisei**, che si formano a causa del movimento di aria che si sposta dalla zona di alta pressione, presente al di sopra delle fasce sub-tropicali del 30° parallelo, verso quelle di bassa pressione equatoriali. A causa della forza di Coriolis, nell'emisfero boreale gli alisei deviano verso destra (alisei di nord-est), mentre nell'emisfero australe deviano verso sinistra (alisei di sud-est).

Fra le latitudini di 25° e 35° N e 25° e 35° S si trovano zone di alta pressione che, invece di costituire fasce continue, si concentrano in **celle anticicloniche** poste sugli oceani. Il

Le modificazioni  
indotte dalla  
rotazione terrestre

Calma equatoriale

Alisei

Celle anticicloniche  
tropicali

movimento a spirale dell'aria divergente da queste due zone si dirige sia verso l'Equatore, generando gli alisei, sia verso i poli, generando i **venti occidentali** (o **controalisei**): questi spirano tra le latitudini di **35° e 60° N** e **35° e 60° S**, provenienti prevalentemente da sud-ovest nell'emisfero boreale e da nord-ovest nell'emisfero australe. Mentre nell'emisfero nord le masse continentali causano interruzioni nella fascia dei venti occidentali, nell'emisfero sud la fascia è pressoché ininterrotta e i venti assumono persistenza e vigore. Le zone polari, artica e antartica, sono caratterizzate da **venti orientali** (perché provenienti da est), **detti anche polari**, che si spostano dalle zone di alta pressione polare verso le fasce di bassa pressione subpolare.

Venti occidentali,  
o controalisei

Venti orientali,  
o polari

La circolazione dell'aria finora descritta si riferisce alla bassa troposfera.

## IL FLUSSO ENERGETICO DAL SOLE ALLA TERRA

L'attività alla superficie del "sistema Terra" è regolata dai flussi energetici provenienti dal Sole, che, attraversando l'atmosfera, agiscono sul pianeta.

L'energia che arriva alla Terra è trasportata da un ampio spettro di onde elettromagnetiche, in particolare radiazioni infrarosse, luminose e ultraviolette. Entrando in contatto con l'atmosfera, tali radiazioni vengono da questa in parte **diffuse**, **riflesse** e **assorbite**; la frazione che riesce ad attraversare completamente l'atmosfera raggiunge la superficie degli oceani e delle terre emerse (che a loro volta la riflettono parzialmente).

La **diffusione** interessa soprattutto le radiazioni luminose (luce visibile): quando esse urtano contro le particelle di gas dell'aria o del pulviscolo, deviano in tutte le direzioni. Tale fenomeno fa sì che circa il 6% della luce solare ritorni verso lo spazio, mentre il restante 94% raggiunge la Terra. La **riflessione** determina la deviazione delle radiazioni in direzioni precise ed è causata dalle nubi, dalla superficie degli oceani e delle terre emerse. Le nubi riflettono, in base alle loro caratteristiche, fra il 30% e il 60% della **radiazione totale** che le colpisce; la superficie dei ghiacciai fino all'85%; le acque fino al 25%; le terre emerse in misura diversa, a secon-

da che si tratti di foreste, di superfici coltivate, di deserti o di aree urbanizzate (il rapporto percentuale fra l'energia in arrivo e quella riflessa è detto **albedo**).

L'**assorbimento**, infine, è operato dalle molecole gassose presenti nei diversi strati dell'atmosfera.

In totale, alla superficie terrestre arriva il 47% dell'energia solare iniziale, che viene assorbita dall'acqua dell'idrosfera e dalle rocce superficiali della litosfera.

Poiché il flusso energetico proveniente dal Sole è continuo e all'inizio costante, la temperatura della Terra dovrebbe aumentare progressivamente. Qualsiasi corpo, però, riscaldandosi emette a sua volta radiazioni, che restituiscono all'ambiente esterno parte dell'energia assorbita. Nel tempo si stabilisce un **equilibrio radiativo**, per cui la quantità di energia assorbita pareggia quella emessa.

Durante questi complessi scambi, l'energia che va a riscaldare le terre emerse e le masse d'acqua oceaniche viene trasmessa poi all'aria. Tali processi attivano i movimenti dei venti e delle correnti marine, il passaggio dell'acqua dall'idrosfera all'atmosfera per evaporazione, la condensazione del vapore acqueo in precipitazioni, cioè tutti i processi che interessano atmosfera e idrosfera.



I venti nell'alta troposfera

Nell'**alta troposfera**, mancando l'attrito esercitato da ostacoli presenti sulla superficie terrestre (per esempio, catene montuose), **i venti si muovono a maggiore velocità**, che tende ad aumentare con l'altezza. Inoltre, **la situazione relativa alla pressione è invertita rispetto al suolo** (alta pressione sulla zona equatoriale e bassa pressione sulle zone polari): quindi, le masse d'aria si spostano dall'Equatore verso i poli e, deviate a causa della rotazione terrestre, generano delle **correnti occidentali, che si spostano verso est seguendo l'andamento dei paralleli**.

Correnti a getto

Alle medie latitudini, le correnti occidentali spirano a velocità molto elevate (da 250 a 500 km/h), tanto da essere chiamate **correnti a getto**. Esse sono paragonabili a "fiumi di aria" molto ampi (fino a 500 km) e poco profondi (alcuni km), che talvolta circondano come un'unica fascia l'intero globo. Si è recentemente scoperto che esistono due correnti a getto in ciascun emisfero: la **corrente a getto del fronte polare**, che soffia a circa 60° di latitudine, e la **corrente a getto subtropicale**, a circa 30° di latitudine. Le correnti a getto sembrano rivestire grande importanza nella formazione e nel movimento delle depressioni, cioè delle aree cicloniche, alle medie latitudini.

## 17.9 Le nubi e la nebbia

Come si è detto nel paragrafo 17.6, quando l'aria è satura di vapore, per abbassamento della temperatura dell'aria o per aggiunta di altro vapore acqueo, il vapore presente in eccesso condensa: si formano così delle goccioline finissime di acqua, che danno origine alle nubi (se la condensazione avviene a una certa quota) o alla **nebbia** (se la condensazione avviene a livello del suolo).

### ■ Le nubi

Le **nubi sono masse d'aria satura di vapore acqueo**, in cui sono sospese numerose goccioline d'acqua (di dimensioni comprese tra i 20 e i 50 millesimi di millimetro) e spesso anche cristalli di ghiaccio. Il numero e le dimensioni delle goccioline dipendono dalla presenza nella massa d'aria dei cosiddetti **nuclei di condensazione**, cioè di particelle finissime come quelle che costituiscono il pulviscolo atmosferico, minuti cristalli di sali o sostanze inquinanti: quanto più numerosi sono i nuclei di condensazione, tanto più numerose e di piccole dimensioni sono le goccioline d'acqua che si formano. Alle medie e alle alte latitudini, è possibile che le parti più alte delle nubi si trovino a una temperatu-

Nuclei di condensazione

ra minore di 0 °C, per cui le goccioline solidificano in piccoli cristalli di ghiaccio.

Una nube può formarsi per afflusso di vapore acqueo in una massa d'aria oppure per raffreddamento dell'aria fino alla temperatura di condensazione del vapore acqueo, secondo diversi meccanismi:

- per **raffreddamento convettivo**, che si determina quando una massa d'aria, riscaldata per contatto con la superficie terrestre, diventa più leggera, sale nella troposfera e, salendo, si raffredda (la temperatura scende di 1 °C ogni 100 m d'altezza);

- per **raffreddamento sinottico**, che avviene quando si incontrano due masse d'aria a diversa temperatura (l'aria più fredda, quindi più densa, tende a collocarsi sotto quella più calda, che invece si solleva e si raffredda);

- per **raffreddamento orografico**, che si verifica quando una massa d'aria, spostandosi, incontra un rilievo montuoso ed è costretta a risalirne i pendii e in tal modo si raffredda.

Le nubi possono essere classificate in base alla loro altezza e il base al loro aspetto.

In base all'altezza a cui si formano, si distinguono: **nubi basse** (sino a 2 km al di sopra della superficie terrestre), **nubi medie** (tra 2 e 6 km) e **nubi alte** (da 6 a 13 km).

In base al loro aspetto, si distinguono tre tipi fondamentali di nubi:

Meccanismi di formazione delle nubi

Raffreddamento convettivo

Raffreddamento sinottico

Raffreddamento orografico

Classificazione delle nubi

**Tabella 17.4** Classificazione delle nubi

	TIPO	DESCRIZIONE
nubi alte	<b>cirri</b>	piccole nubi con forme a banchi o a strisce, di colore bianco; spesso si presentano come filamenti a forma di piumetta
	<b>cirrocumuli</b>	si dispongono a increspature, strisce e piccoli fiocchi, formando il caratteristico "cielo a pecorelle"
	<b>cirrostrati</b>	formano un velo bianco trasparente, liscio e uniforme o fibroso, talora con aloni
nubi medie	<b>altocumuli</b>	la forma è molto variabile; possono essere a banchi oppure continue
	<b>altostrati</b>	distesa nuvolosa informe e grigia; il Sole vi può penetrare debolmente, ma non si hanno fenomeni ottici particolari
	<b>nembostrati</b>	tipiche nubi di pioggia, grigie, scure, opache
nubi basse	<b>stratocumuli</b>	formano una coltre grigia o biancastra con bande scure; si presentano spesso in rotoli, ondulazioni e masse arrotondate
	<b>strati</b>	formano un caratteristico strato grigio uniforme, a frammenti o continuo; spesso producono pioviggine, prismi di ghiaccio o nevischio
	<b>cumuli</b>	nubi bianche, separate le une dalle altre, dense, con sviluppo chiaramente verticale; la base è piatta e la parte superiore a forma di cavolfiore
	<b>cumulonembi</b>	sono l'estremo sviluppo verticale dei cumuli; hanno l'aspetto di una torre, sono scuri alla base e spesso accompagnati da temporali

Cumuli	● i <b>cumuli</b> , nubi bianche, separate le une dalle altre, dense, con sviluppo verticale, con la base piatta e la parte superiore a forma di cavolfiore;
Strati	● gli <b>strati</b> , così chiamati perché formano uno strato grigio uniforme, a frammenti o continuo;
Cirri	● i <b>cirri</b> , piccole nubi generalmente alte, a strisce e di colore bianco, che contengono spesso cristalli di ghiaccio, data l'altezza a cui si formano.

La classificazione più completa delle nubi è quella proposta dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale, che divide le nubi in 10 generi e numerose specie e varietà (tab. 17.4).

### ■ La nebbia

La **nebbia** è una massa d'aria satura di vapore acqueo, che si forma vicino al suolo e che, rispetto alle nubi, presenta spessore minore e contiene **goccioline d'acqua di dimensioni più piccole**. La condensazione del vapore acqueo è dovuta in questo caso alla differenza di temperatura che si instaura tra il suolo e l'aria sovrastante: in base ai meccanismi con i quali ciò avviene, si distinguono nebbie da advezione e nebbie da irraggiamento.

**Nebbie da advezione** Le **nebbie da advezione** si possono originare quando masse d'aria fredda permangono al di sopra di un suolo o di una massa d'acqua relativamente più caldi, oppure quando i venti portano aria umida e calda sopra a suoli o masse d'acqua più freddi.

**Nebbie da irraggiamento** Le **nebbie da irraggiamento** si formano al calar del Sole, quando la temperatura del suolo comincia a diminuire in seguito a perdita di calore per irraggiamento; successivamente, anche l'aria sovrastante si raffredda e il vapore acqueo in essa contenuto condensa, originando la nebbia. Il fenomeno è più evidente con cielo sereno (perché maggiore è la perdita di calore per irraggiamento, mancando la copertura nuvolosa che riflette le radiazioni emesse dalla Terra) e in zone ricche di masse d'acqua (laghi, fiumi ecc.), perché maggiore in questo caso è l'evaporazione che rende l'aria più umida.

## 17.10 Le precipitazioni

Sono considerate precipitazioni tutte le forme liquide o solide che assume il vapore acqueo e che cadono al suolo, come **pioggia** (gocce d'acqua), **neve** e **grandine** (cristalli di ghiaccio); vengono considerate precipitazioni anche le forme liquide e solide che si formano al suolo, quali la **rugiada** e la **brina**.

Perché si formino le precipitazioni, è necessario che le goccioline d'acqua contenute all'interno delle nubi diventino tanto grosse da non poter più essere sostenute da correnti ascensionali presenti nelle nubi stesse, per cui cadono al suolo per effetto della forza di gravità. Le gocce di **pioggia** (le cui dimensioni variano da qualche decimo di millimetro a qualche millimetro) si formano per **coalescenza** (dal latino *coalescere*, crescere assieme), cioè per progressiva unione, aggregazione di più goccioline.

Pioggia

Lo stesso processo può interessare i cristalli di ghiaccio che si saldano, dando origine ai fiocchi di **neve**; essi si formano per sublimazione del vapore acqueo, quando la temperatura delle nubi scende al di sotto del punto di congelamento dell'acqua.

Neve

La **grandine** è costituita da chicchi di ghiaccio in cui si riconosce una struttura a strati concentrici sovrapposti; essa si forma a causa dei violenti moti convettivi dell'aria all'interno dei turbolenti cumulonembi, (nubi molto alte e strette): le goccioline d'acqua vengono portate verso la parte alta della nube, dove congelano e ricadono, per gravità, verso il basso, rivestendosi di altra acqua; a causa dei moti convettivi nella nube, il ciclo si ripete più volte, finché il chicco di grandine non diventa tanto grande da precipitare al suolo.

Grandine

La **rugiada** è costituita da goccioline d'acqua formatesi sul terreno durante la notte, quando l'aria a contatto col suolo si raffredda fino a provocare la condensazione del vapore acqueo. Se la temperatura notturna scende al di sotto di 0 °C, il vapore acqueo sublima formando la **brina**, costituita da minutissimi aghi di ghiaccio.

Rugiada e brina

Le precipitazioni vengono misurate in millimetri (come altezza della lama d'acqua al suolo), attraverso strumenti detti **pluviometri**.

La misurazione delle precipitazioni

La distribuzione geografica delle precipitazioni viene rappresentata sulle carte attraverso le **isoiete**, linee immaginarie che uniscono tutti i punti caratterizzati da una stessa quantità di precipitazioni nel periodo considerato. La distribuzione delle precipitazioni in una determinata zona in un certo arco di tempo (mese o anno) prende il nome di **regime pluviometrico**.

## 17.11 Le perturbazioni atmosferiche

Nel paragrafo precedente si è visto che su determinate aree della Terra ci sono zone di bassa e di alta pressione permanenti; ma, oltre a queste, esistono anche cicloni (aree di bassa pressione) e anticicloni (aree di alta pressione) tempora-

nei, che cambiano di ora in ora la loro posizione e che determinano condizioni meteorologiche instabili. I cicloni, in particolare, generano moti ascendenti di aria che, raffreddandosi, dà luogo a nubi e precipitazioni: per questo motivo essi vengono considerati **perturbazioni atmosferiche**. Sono dette **cicloni extratropicali** le perturbazioni che si verificano alle medie latitudini e si estendono per migliaia di chilometri e **cicloni tropicali** quelle che riguardano le basse latitudini, meno estese ma catastrofiche.

### ■ I cicloni extratropicali

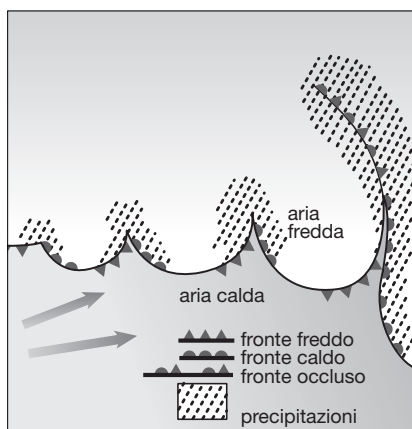
I cicloni extratropicali determinano l'andamento del tempo alle medie latitudini e si devono all'incontro di masse d'aria calda e umida, di provenienza tropicale, con masse d'aria fredde e secche di provenienza polare.

Le masse d'aria

Per **masse d'aria** s'intendono grandi volumi d'aria, che presentano caratteri di omogeneità, le cui caratteristiche fisiche più peculiari consistono nella distribuzione orizzontale quasi uniforme di temperatura e di umidità; in base al loro luogo d'origine, esse vengono classificate in **masse d'aria polari** (fredde) e **masse d'aria tropicali** (calde); in base alla superficie su cui scorrono, possono inoltre essere distinte in **continentali** (secche) e **marittime** (umide).

Che cos'è un fronte

Quando due masse d'aria di diversa provenienza s'incontrano, mantengono inalterate le loro caratteristiche e sono separate da una superficie di discontinuità detta **fronte**: si distinguono un fronte caldo, un fronte freddo e un fronte occluso (fig. 17.5).



**Figura 17.5**

Fronte freddo, fronte caldo e fronte occluso.

Un **fronte caldo** si forma quando una massa d'aria calda e umida, di provenienza tropicale, avanza dietro una massa d'aria fredda che si sta spostando; lungo il fronte si ha la formazione di nubi stratificate e precipitazioni deboli e persistenti.

Fronte caldo

Un **fronte freddo** si forma quando s'incontrano una massa d'aria fredda e secca, proveniente dai poli, con una massa d'aria calda e umida, proveniente dai tropici. In questo tipo di fronte, l'aria fredda, più densa, tende a insinuarsi sotto quella calda, che, sollevata vigorosamente in quota, dà luogo alla formazione di imponenti sistemi nuvolosi cumuliformi (poiché la superficie di contatto tra le due masse d'aria è quasi verticale rispetto alla superficie terrestre) e a precipitazioni di carattere temporalesco, violente ma di breve durata.

Fronte freddo

Un **fronte occluso** separa due masse d'aria entrambe fredde e si forma quando un fronte freddo, che si sposta più velocemente, raggiunge un fronte caldo; un fronte occluso è caratterizzato da aria calda in quota e aria fredda al suolo e dalla sovrapposizione dei due sistemi nuvolosi, con manifestazione di fenomeni tipici sia del fronte caldo, sia di quello freddo.

Fronte occluso

## ■ I cicloni tropicali

A seconda delle zone in cui si manifestano, i **cicloni tropicali** sono anche chiamati **uragani** (oceano Atlantico e Pacifico meridionale), **tornado** (America Centro-settentrionale), **tifoni** (oceano Pacifico settentrionale) e **willy-willies** (Australia nordoccidentale).

I diversi nomi

**I cicloni tropicali si originano per forti differenze di pressione**, mentre sono minime le differenze di temperatura: **perciò, non si generano fronti**, come nel caso precedente, **ma vortici d'aria**, con una zona di pressione molto bassa al centro. Il tipo fondamentale del ciclone tropicale è caratterizzato da una zona non molto estesa, ma profonda, al cui centro la pressione è inferiore a quella normale di 760 mm Hg; attorno al centro, l'aria, calda e ricca di vapore acqueo, si solleva in correnti ascendenti con andamento vorticoso, la cui velocità raggiunge e talora supera i 200 km/h, lasciando un vuoto che viene colmato da masse d'aria provenienti da zone limitrofe a pressione maggiore. Presso il centro del ciclone si trova una zona di calma, detta **occhio del ciclone**, con poche nubi. Solitamente i cicloni si originano alle basse latitudini e si spostano verso ovest o nord-ovest, con violente piogge e forti venti sui luoghi interessati.

Caratteristiche del ciclone tropicale

L'occhio del ciclone

## 17.12 El Niño

Negli ultimi due decenni del secolo XX gli scienziati hanno riconosciuto la straordinaria importanza di un fenomeno atmosferico oggi noto come **ENSO** (El Niño-Southern Oscillation), che periodicamente produce effetti molto intensi al livello mondiale ma che in precedenza era conosciuto soltanto localmente sulle coste peruviane, dove si manifesta come un aumento della temperatura delle acque del Pacifico associata a una riduzione della pescosità..

Si tratta in pratica di un fenomeno di distruzione periodica dell'equilibrio del sistema atmosfera-oceano, con oscillazioni che nell'ultimo secolo hanno avuto una frequenza compresa tra quattro e sette anni. Le sue cause non sono ancora ben conosciute, ma gli effetti possono essere catastrofici: si manifestano infatti sotto forma di gravi siccità in alcune zone (Australia, Sahel, Estremo oriente) e di piogge torrenziali in altre regioni (California, Indonesia, Africa orientale).

## 17.13 Le previsioni del tempo

Le previsioni del tempo si basano soprattutto sulla conoscenza del sistema dei fronti caldi e freddi e dei cicloni extratropicali, descritto e analizzato tra il 1920 e il 1930 da Jacob Bjerknes (1897-1975), uno studioso americano di origine norvegese. Per ottenere risultati attendibili, però, occorreva disporre di una rete di strumenti di misura il più possibile numerosi e precisi, cosa che è divenuta possibile solo nella seconda metà del secolo XX.

Attualmente le **stazioni meteorologiche** disseminate in tutto il mondo sono più di 10.000, molte delle quali si trovano in mare a bordo di imbarcazioni appositamente attrezzate, e a intervalli di qualche ora (ma in certi grandi aeroporti anche di 30 minuti) effettuano misurazioni dei sette parametri fondamentali dell'atmosfera in base ai quali si definisce ogni situazione meteorologica: **pressione, temperatura, densità, umidità** e le tre componenti (**direzione, verso e intensità**) della **velocità del vento**. Vi sono poi diverse centinaia di stazioni che eseguono rilevazioni in quota (fino a 20-30 km di altezza) per mezzo di **palloni sonda**, e altre ancora che fanno uso del **radar**, installato a terra o montato su aeroplani. Naturalmente le stazioni meteorologiche non sono distribuite in modo uniforme, in parte a causa dell'irregolarità della superficie terrestre, ma anche per il diverso grado di sviluppo delle varie nazioni. A

questo stato di incompletezza rimediano in gran parte i **satelliti meteorologici**, che oggi sono in grado di analizzare l'andamento delle masse d'aria su tutta la superficie del pianeta e di trasmettere i risultati a terra in tempo utile.

Tutti i dati così raccolti vengono trasmessi ai vari centri e uffici meteorologici che fanno parte dell'**Organizzazione Meteorologica Mondiale** (OMM), con sede a Ginevra. Per l'Europa è particolarmente importante il **Centro europeo per le previsioni a medio termine** (ECMWF) situato a Reading, presso Londra, che si avvale della collaborazione di 18 paesi tra i quali l'Italia. I dati di Reading vengono poi rielaborati dai diversi enti locali con l'aggiunta di altri dati raccolti nelle rispettive zone: in Italia se ne occupa il servizio meteorologico dell'Aeronautica militare che a questo scopo ha istituito nel 1981 il sistema "Afrodite" e poi, nel 1988, il sistema "Argo", capace di eseguire previsioni partcolareggiate per 150 località del nostro paese.

In questi centri avviene l'elaborazione dei dati per le **previsioni numeriche**. Fin dagli albori della meteorologia era stata concepita l'idea che le previsioni del tempo si potessero trattare come un qualsiasi problema risolvibile con le equazioni della fisica, ma all'atto pratico questo non si poteva realizzare perché richiedeva una capacità di calcolo che fino a qualche decennio fa sarebbe stata impensabile. Oggi queste difficoltà si possono considerare in gran parte superate grazie al rapido progresso degli elaboratori elettronici.

Presso il centro di Reading vengono eseguite previsioni dei movimenti orizzontali e verticali delle masse d'aria, della pressione e della temperatura in quota e in superficie, alle quali viene attribuita una validità di sei giorni (con indicazioni di massima fino a nove giorni). Per i calcoli viene utilizzato un modello matematico che divide idealmente l'atmosfera in 31 strati, a loro volta suddivisi in un totale di oltre 3 milioni di "cubi" di 55 km di lato, che si estende fino a 30 km di altitudine. Per definire lo stato dell'atmosfera in qualsiasi momento sono necessari 6 milioni di numeri, e per formulare una normale previsione a medio termine occorrono ben 6000 miliardi di operazioni.

In teoria i limiti delle previsioni di Reading potrebbero essere estesi fino a due settimane, a patto che vengano eliminati tutti i possibili errori all'interno del modello, e in futuro anche a periodi più lunghi a condizione che siano disponibili dati più numerosi e più precisi.

Grazie a questi sviluppi tecnologici è stato possibile



ridurre sempre più l'importanza del fattore umano, e quindi la soggettività delle previsioni. Tuttavia l'intervento dell'uomo rimane ancora indispensabile per l'interpretazione dei dati, e anche per la presentazione delle previsioni al pubblico generico.

I servizi meteorologici nazionali e internazionali preparano tra l'altro le **carte sinottiche**, che presentano la distribuzione dei vari parametri osservata in uno stesso istante, al suolo e in quota, su grandi regioni della Terra. Sono queste le carte che in forma solitamente semplificata vediamo riprodotte sui giornali o presentate in televisione e che, integrate da immagini fotografiche riprese dai satelliti artificiali, illustrano la distribuzione delle masse d'aria e i loro spostamenti nel corso del tempo. Generalmente mostrano l'andamento delle isobare, i fronti caldi e freddi, e spesso anche la direzione del vento.

## GLOSSARIO

### **Anticiclone**

Area di alta pressione atmosferica, delimitata da isobare chiuse, con valori di pressione decrescenti dal centro verso la periferia.

### **Aurora polare**

Fenomeno luminoso che si verifica nella ionosfera sotto forma di archi e raggi multicolori, caratteristico delle zone polari e circumpolari; è causato da corpuscoli di origine solare che colpiscono ad alta velocità le particelle ionizzate dell'alta atmosfera terrestre.

### **Ciclone**

Area di bassa pressione atmosferica, delimitata da isobare chiuse, con valori di pressione crescenti dal centro verso la periferia; detto anche di vento che spira vorticosamente attorno a un centro di bassa pressione.

### **Clorofluorocarburi (CFC)**

Composti chimici organici, contenenti cloro e fluoro, impiegati sia come fluidi refrigeranti nell'industria del freddo, sia come propellenti nelle bombole di aerosol; sono ritenuti responsabili della distruzione di gran parte dell'ozono stratosferico.

### **Coriolis, effetto di**

Fenomeno fisico per cui un corpo che si sposta liberamente su una superficie ruotante subisce una apparente deviazione, verso destra o verso sinistra, nella direzione di movimento.

### **Ionosfera**

Regione dell'atmosfera costituita da un insieme di strati d'aria ionizzati ben delimitati, che si estende da una quota di 60-80 km nella mesosfera e nella termosfera.

### **Nube**

Ammasso di minuscole gocce d'acqua, o di cristalli di ghiaccio, che si forma nell'atmosfera per condensazione del vapore acqueo intorno a particelle di pulviscolo o a ioni che fungono da nuclei di condensazione.

### **Ozono**

Forma in cui si presenta l'ossigeno, costituita da una molecola triatomica, O<sub>3</sub>, anziché dalle più diffuse molecole biatomiche, O<sub>2</sub>; la massima concentrazione di ozono si raggiunge a livello dell'ozonosfera.

### **Sublimazione**

Passaggio diretto di una sostanza dallo stato solido a quello aeriforme.

## TEST DI VERIFICA

**1 Circa 4,5 miliardi di anni fa l'atmosfera era costituita prevalentemente da:**

- a ammoniaca, acqua, metano e ossigeno;
- b diossido di carbonio, idrogeno, elio, ammoniaca;
- c azoto, metano, ossigeno, idrogeno;
- d idrogeno, elio, metano, ammoniaca, acqua.

**2 La composizione chimica dell'aria è:**

- a ossigeno 78%, azoto 21%, diossido di carbonio 1%;
- b diossido di carbonio 78%, ossigeno 21%, altri gas 1%;
- c azoto 78%, ossigeno 21%, altri gas 1%.

**3 Il gradiente geotermico che caratterizza la troposfera è di:**

- a 6,5 °C/km;
- b 65 °C/km;
- c 0,65 °C/km;
- d nessuna delle precedenti.

**4 La velocità dei venti dipende da:**

- a forza di Coriolis;
- b gradiente barico;
- c differenza di umidità tra le diverse masse d'aria;
- d temperatura.

**5 Una nube si forma quando:**

- a l'aria diviene localmente satura;
- b l'umidità assoluta dell'aria subisce una locale diminuzione;
- c l'aria diviene localmente povera di vapore acqueo;
- d l'umidità relativa aumenta per diminuzione della temperatura.

**6 Le isoterme sono linee che congiungono tutti i punti con uguale:**

- a precipitazione;
- b pressione;
- c umidità;
- d temperatura.

**7 La radiazione solare che effettivamente raggiunge il suolo è:**

- a il 50%;
- b il 27%;
- c il 47%;
- d il 100%.

**8 La circolazione delle masse d'aria all'interno di un anticiclone nell'emisfero boreale avviene:**

- a in senso orario e verso il centro dell'anticiclone;
- b in senso orario e verso la periferia dell'anticiclone;
- c in senso antiorario e verso il centro dell'anticiclone;
- d in senso antiorario e verso la periferia dell'anticiclone.

**9 Quali tra i seguenti venti non spirano nella bassa troposfera?**

- a alisei;
- b correnti occidentali;
- c venti occidentali;
- d venti orientali polari.

R

1 d; 2 c; 3 a; 4 b; 5 a; 6 b; 7 c; 8 b; 9 d

# 18 I climi

---

**La distribuzione degli esseri viventi sulla Terra**, particolarmente delle specie vegetali, le caratteristiche dei suoli **e la stessa attività umana sono fortemente condizionati dal clima**, cioè l'insieme delle condizioni meteorologiche che mediamente caratterizzano una determinata regione.

Per descrivere il clima di una regione si ricorre a diverse grandezze, dette **elementi del clima**, quali la temperatura, la pressione atmosferica e i venti, l'umidità e le precipitazioni, che a loro volta dipendono da alcuni **fattori del clima**, quali la latitudine, l'altitudine, la distanza dal mare, la presenza di catene montuose, l'esposizione al Sole e ai venti.

Data la grande variabilità di elementi e fattori del clima, sulla Terra esiste una notevole varietà di climi, che tuttavia possono essere riuniti in alcuni gruppi principali: si è proceduto alla **classificazione dei climi** in base a diversi criteri, ma la classificazione più nota è quella proposta dal meteorologo russo **W. Köppen**, che si basa sulla distribuzione geografica delle associazioni vegetali. La gran varietà di climi presenti sulla Terra è stata così ridotta a un numero limitato di **gruppi climatici**, che interessano vaste aree della Terra e ciascuno dei quali comprende diversi **tipi climatici**, che riguardano aree più ristrette.

## 18.1 Il tempo e il clima

Se si esclude l'intervento dell'uomo come agente artificiale di diffusione delle specie animali e vegetali, la distribuzione degli organismi sulla Terra è dovuta essenzialmente alle particolari condizioni climatiche che caratterizzano una determinata regione: spostandosi dall'Equatore verso i poli, in entrambi gli emisferi, notevoli sono le differenze climatiche e diverse le associazioni di organismi che si incontrano. Prima di procedere a una dettagliata descrizione dei fattori che concorrono a determinare il clima e dei vari tipi di clima presenti sulla Terra, è opportuno chiarire il significato di due termini – **tempo** e **clima** – che, parlando di condizioni climatiche, vengono spesso confusi.

Per **tempo atmosferico** si intende il complesso delle condizioni meteorologiche – temperatura, pressione, umidità, che sono responsabili dei venti, della copertura nuvolosa e delle precipitazioni – che caratterizzano la troposfera, lo strato più basso dell'atmosfera (v. cap. 17), **in un dato momento** e **in un dato luogo**; per “momento” si considera un intervallo di tempo breve, che può essere di un giorno o di al-

Che cos'è il tempo atmosferico

cuni giorni o anche di un'ora o di un minuto. La scienza che studia il tempo atmosferico, come prima definito, è detta **meteorologia**.

Il **clima rappresenta**, invece, **l'insieme delle condizioni meteorologiche** (cioè del tempo) che si osservano in un dato luogo **nel corso di un anno**, sulla base di rilevazioni effettuate per un periodo di almeno 30 anni. Che cos'è il clima

La scienza che studia i vari fattori che determinano un clima (attingendo le informazioni dalla meteorologia) è la **climatologia**: essa si occupa anche dei reciproci rapporti tra i diversi fattori, della loro influenza sull'ambiente fisico e biologico e delle variazioni che subiscono in relazione alle condizioni geografiche. La climatologia

## 18.2 Elementi e fattori del clima

Per descrivere il clima di una regione, si ricorre agli **elementi del clima**, cioè la **temperatura**, la **pressione**, i **venti**, l'**umidità**, le **precipitazioni** e la **nuvolosità**: tutti questi elementi (dettagliatamente descritti nel cap. 17) vengono rilevati dalla rete di stazioni meteorologiche, estesa su tutta la superficie terrestre; più recentemente, a essa si è aggiunto un nuovo sistema di rilevazione attraverso i satelliti meteorologici, messi in orbita intorno alla Terra. Gli elementi del clima

A loro volta, gli elementi del clima dipendono dai **fattori del clima** (di seguito analizzati), che comprendono la **latitudine**, l'**altitudine**, la **distanza dal mare**, l'**influenza delle correnti marine**, la **presenza di catene montuose**, l'esposizione al Sole e ai venti. I fattori che determinano il clima

La **latitudine** è la distanza angolare di un punto dall'Equatore (v. cap. 5); essa influisce sulla temperatura, che diminuisce procedendo dall'Equatore verso i poli (più una regione è lontana dall'Equatore, più cresce l'inclinazione dei raggi solari sulla superficie terrestre e più si riduce il calore dei raggi solari che la raggiungono). Latitudine

L'**altitudine** è l'altezza di un punto rispetto al livello del mare; essa influisce sulla temperatura e sulla piovosità; la temperatura diminuisce di circa 0,6 °C ogni 100 m di ascensione; a quote più elevate, si formano più facilmente nubi che danno piogge (v. cap. 17). Altitudine

La **distanza dal mare** influisce sulla temperatura e sull'umidità. A causa della diversa capacità termica della terraferma e dell'acqua, le terre si riscaldano più dei mari durante il giorno e durante la stagione estiva; ne derivano, quindi, escursioni termiche giornaliere e annue più marcate sulla terraferma, tanto più marcate quanto più aumenta la distanza dal Distanza dal mare

mare; inoltre, lungo le coste il clima è di norma più umido che non all'interno (sui mari c'è una forte evaporazione e l'aria è più umida).

Correnti marine

Le **correnti marine** possono essere paragonate a grandi fiumi di acqua, calda o fredda, che scorrono all'interno dei mari (v. a p. 250), influenzando sulle condizioni di temperatura: per esempio, la Norvegia, lambita dalla corrente del Golfo, corrente calda che ha origine nel golfo del Messico, ha un clima più mite della Groenlandia, situata alla stessa latitudine, ma lambita dalla corrente del Labrador, corrente fredda che scende dalla penisola del Labrador (Canada).

Catene montuose

La presenza di **catene montuose** assume importanza per la determinazione dei climi a livello locale, interagendo per esempio con i venti, che vengono ostacolati, e influenzando la temperatura, a seconda che si consideri il versante esposto al Sole o quello in ombra.

Esposizione al Sole

L'**esposizione al Sole** influisce sulla temperatura; nel nostro emisfero, le aree esposte a sud godono di un periodo di insolazione maggiore di quelle esposte a nord.

Esposizione ai venti

L'**esposizione ai venti** influisce sulla temperatura, sull'umidità e sulla piovosità; i versanti dei monti esposti verso il mare sono umidi e freschi, quelli della parte opposta sono caldi e asciutti.

## 18.3 La classificazione dei climi

L'estrema variabilità dei fattori climatici e la loro interazione determinano la presenza sulla Terra di una grande varietà di climi locali; tuttavia, il loro numero può essere ridotto a un numero più limitato di climi che interessano vaste aree della Terra (fig. 18.1).

La proposta di Köppen

Numerosi e diversi sono i criteri suggeriti per classificare i climi: la classificazione più nota è quella proposta dal meteorologo russo **Wladimir Köppen** (1864-1940), che **si basa soprattutto sulla distribuzione geografica delle associazioni vegetali**, cioè l'insieme delle diverse specie di piante caratteristico di una determinata area: ma, avendo le piante determinate esigenze climatiche (di temperatura, di umidità ecc.) per poter vivere e crescere in una certa zona, le associazioni vegetali sono anche indice del clima di una data regione. La classificazione di Köppen prevede cinque **gruppi climatici** (disposti in fasce nella direzione dei paralleli e simmetrici nei due emisferi, a nord e a sud dell'Equatore), che corrispondono alle grandi associazioni vegetali presenti sulla Terra e che sono distinti soprattutto in base alle temperature medie; all'interno dei gruppi climatici sono compresi diversi ti-

I gruppi e i tipi climatici

pi climatici, che si differenziano in base alla quantità e alla distribuzione delle precipitazioni nell'arco dell'anno (tab. 18.1).

**Tabella 18.1** Classificazione dei climi\*

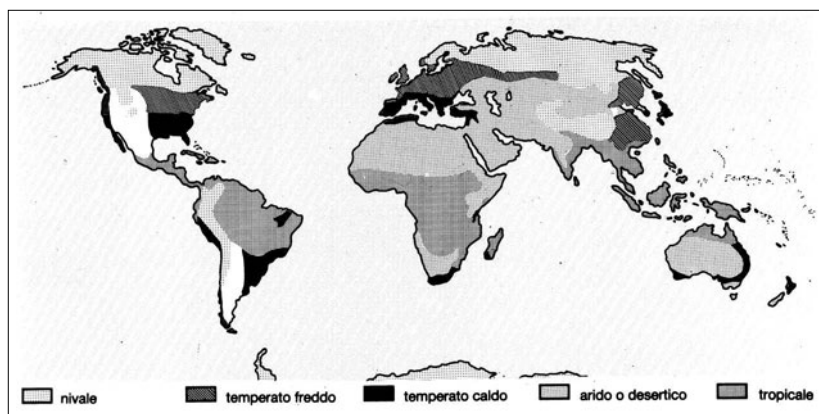
TIPI CLIMATICI	CARATTERISTICHE	VARIETÀ	CARATTERISTICHE
climi umidi	temperatura del mese più freddo superiore ai 15 °C; almeno sei mesi di precipitazioni, compensanti la forte evaporazione	clima equatoriale o della foresta pluviale	almeno nove mesi di precipitazioni con un totale pluviometrico medio di 2000 mm annui; temperature elevate con deboli escursioni giornaliere e annue
		clima della savana	escursioni giornaliere e annue più sensibili (10 °C); umidità minore, due stagioni differenziate, una invernale e una estiva, con piovosità accentuata nel clima monsonico (foreste tropicali)
climi aridi	mesi aridi (cioè con un totale pluviometrico in mm inferiore o uguale al doppio della temperatura media) in numero superiore a sei	clima arido caldo o desertico	precipitazioni annue inferiori o uguali a 250 mm; la temperatura del mese più freddo è superiore ai 6 °C; la stagione arida può estendersi all'intero anno
		clima steppico o arido con inverno freddo	temperatura del mese più freddo inferiore ai 6 °C; forti escursioni annue con estati molto calde e inverni rigidi; piovosità molto scarsa
climi mesotermici	temperatura del mese più freddo compresa tra 2 °C e 15 °C	clima umido temperato caldo con inverno secco o tropicale montano	escursione annua limitata; precipitazioni abbondanti (2000 mm), che consentono lo sviluppo di una folta vegetazione con caratteri simili a quelli della foresta tropicale
		clima umido temperato caldo con estate secca o mediterraneo	piovosità intorno ai 1000 mm annui; piogge prevalentemente invernali; salendo in latitudine si distinguono due massimi, uno primaverile e uno autunnale (clima semi-continentale, per esempio, clima padano-danubiano; la temperatura del mese più freddo è prossima a 0 °C)
		clima temperato umido di tipo marittimo	temperatura del mese più caldo compresa tra 10 °C e 20 °C; piogge distribuite lungo tutto l'anno con massimi autunnali e invernali
climi microtermici	temperatura media del mese più freddo uguale o inferiore a - 2 °C e temperatura media del mese più caldo uguale o superiore a 10 °C	clima boreale freddo con precipitazioni in quasi tutto l'anno (taiga)	mesi freddi in numero massimo di otto; precipitazioni molto scarse specie nell'interno dei continenti
		clima boreale freddo con inverno secco (clima siberiano)	numero dei mesi freddi, cioè con temperatura media inferiore a 10 °C, superiore a otto; lunghi periodi di gelo con temperature anche di - 50 °C; precipitazioni molto scarse
climi nivali	temperatura del mese più caldo sempre inferiore ai 10 °C, forti escursioni stagionali e deboli escursioni giornaliere; precipitazioni molto scarse	clima seminivale o delle tundre	la temperatura media del mese più caldo supera gli 0 °C
		clima del gelo perenne	temperatura media del mese più caldo sempre sottozero

\* secondo W. Köppen (modificato)

Climi megatermici	<p>I gruppi climatici vengono distinti in:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>climi megatermici</b>, in cui la temperatura media del mese più freddo è superiore a 15 °C, a loro volta distinti in climi megatermici <b>umidi</b> e climi megatermici <b>aridi</b>, a seconda della quantità delle precipitazioni;</li> </ul>
Climi mesotermici	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>climi mesotermici</b>, in cui la temperatura media del mese più freddo è compresa tra 2 e 15 °C;</li> </ul>
Climi microtermici	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>climi microtermici</b>, in cui la temperatura media del mese più freddo è uguale o inferiore a - 2 °C e la temperatura media del mese più caldo è uguale o superiore a 10 °C;</li> </ul>
Climi nivali	<ul style="list-style-type: none"> <li>● <b>climi nivali</b>, in cui la temperatura del mese più caldo è inferiore a 10 °C.</li> </ul> <p>Non esiste un confine netto fra zone adiacenti appartenenti a gruppi o a tipi climatici diversi: il passaggio da un gruppo o tipo climatico a un altro avviene in modo graduale, per cui esistono zone caratterizzate da climi di transizione.</p>

## 18.4 I climi megatermici umidi

Tre tipi climatici	<p><b>All'interno di questo gruppo climatico</b>, che interessa la fascia intertropicale, <b>si distinguono tre tipi climatici</b>, clima <b>equatoriale</b>, clima <b>della savana</b> e clima <b>monsonico</b>, tutti caratterizzati da abbondanti precipitazioni (oltre 2000 mm all'anno), ma distribuite in modo diverso nell'arco dell'anno.</p>
Clima equatoriale	<p>Il <b>clima equatoriale</b>, tipico della zona compresa tra 10° N e 10° S di latitudine, è caratterizzato da una temperatura media elevata, intorno ai 27 °C, che si mantiene uniforme nel corso dell'anno, essendo ridotte le variazioni stagionali. Data l'intensa evapotraspirazione, l'umidità atmosferica è elevata e dà luogo ad abbondanti precipitazioni giornaliere, che consentono lo sviluppo di una rigogliosa e lussureggiante vegetazione. L'associazione vegetale tipica di questo clima è la <b>foresta pluviale</b>, detta anche foresta equatoriale, costituita da un fitto intreccio di alberi molto alti di specie eliofile (letteralmente, amanti della luce), al di sotto dei quali crescono piante più basse di specie ombrofile.</p>
La foresta pluviale	
Clima della savana	<p>Il <b>clima della savana</b>, detto anche subequatoriale, è caratterizzato da temperature medie mensili sempre superiori ai 20 °C e da piovosità elevata; tuttavia, le precipitazioni non sono distribuite in modo uniforme, ma concentrate nel periodo in cui il Sole passa sullo zenit del luogo: si alternano dunque sei mesi di pioggia e sei di siccità. L'associazione vegetale che caratterizza questo clima è la <b>savana</b>, costituita soprattutto da piante erbacee perenni e da pochi e isolati alberi di acacie, baobab ed euforbie, specie xerofite (dal gre-</p>



co *xerós*, secco e *phytón*, pianta), cioè adattate a lunghi periodi di siccità.

Il **clima monsonico** interessa soprattutto le coste lungo l'oceano Indiano ed è caratterizzato da una stagione estiva con forti precipitazioni, dovute ai monsoni che spirano dall'oceano, e da una stagione invernale piuttosto secca. L'associazione tipica del clima monsonico è la **giungla**, che si distingue dalla foresta equatoriale per il fatto che, durante la stagione secca, gli alberi perdono le foglie.

Un clima simile a quello monsonico caratterizza anche le coste del Venezuela e quelle del Golfo di Guinea: in questo caso responsabili delle piogge estive sono i venti alisei, mentre l'inverno è breve, fresco e asciutto.

**Figura 18.1**

*La distribuzione dei principali tipi di clima sulla Terra.*

La giungla monsonica

## 18.5 I climi aridi

All'interno di questo gruppo climatico si distinguono **due tipi climatici**, clima **arido caldo** e clima **arido freddo**; entrambi sono caratterizzati dalla scarsità delle precipitazioni (inferiori a 250 mm all'anno). Le associazioni vegetali tipiche di entrambi possono essere il **deserto** (con poche specie vegetali tranne in corrispondenza delle oasi, zone in cui la vegetazione è rigogliosa grazie all'affioramento in superficie delle acque sotterranee) o la **steppa** (associazione di piante erbacee di specie alofite, cioè capaci di vivere in suoli ricchi di sali minerali).

Il **clima arido caldo** è caratterizzato da temperature medie annue superiori a 18 °C e da forti escursioni termiche diurne (fino a 50 °C). I deserti caldi occupano una fascia che cor-

Due tipi climatici

Deserto e steppa

Clima arido caldo



risponde alla zona delle alte pressioni tropicali: **Sahara e Kalahari** in Africa, **deserti della Penisola Arabica**, dell'Iran e del Pakistan in Asia, **deserti dell'Australia occidentale** e di **Atacama in Cile**.

Clima arido freddo

Il **clima arido freddo** è caratterizzato da temperature medie annue inferiori a 18 °C, con forti escursioni termiche sia annuali, sia diurne e frequenti episodi di gelo notturno, poiché la temperatura scende sotto 0 °C. La scarsità delle precipitazioni è dovuta sia alla notevole distanza dal mare, sia alla presenza di catene montuose che spesso ostacolano masse d'aria umida provenienti dagli oceani. Tra le regioni caratterizzate da questo tipo di clima ricordiamo la **zona che si estende dal Mar Caspio fino al deserto dei Gobi in Mongolia**, il **Gran Bacino** e il **Gran Deserto Sabbioso in Nordamerica** e la **Patagonia** in Sudamerica.

## 18.6 I climi mesotermici

Tre tipi climatici

In base alla distribuzione delle piogge, all'interno di questo gruppo climatico si distinguono **tre tipi climatici**: il **clima sinico**, il **clima mediterraneo** e il **clima temperato fresco**.

Clima sinico

Il **clima sinico** caratterizza la parte orientale dei continenti, compresa tra circa 20 e 35° di latitudine Nord e 20 e 35° di latitudine Sud; presenta qualche somiglianza col clima monsonico, poiché gli inverni sono freschi e secchi e le precipitazioni (tra 1000 e 2000 mm annui) sono concentrate in estate, ma mostra escursioni termiche annuali maggiori del clima monsonico. L'associazione vegetale presente in zone con questo clima è la **foresta di piante sempreverdi** (con prevalenza di magnolie, glicine e camelie), associate a piante più tipiche di zone monsoniche, tra le quali bambù e palme. Il clima sinico è tipico oltre che delle regioni orientali della **Cina** (da cui deriva il nome), degli **Stati Uniti orientali**, delle **regioni meridionali del Brasile**, del **sud-est dell'Australia**, di parte della **Nuova Zelanda** e di **piccole zone del Sudafrica**.

Clima mediterraneo

Il **clima mediterraneo** ha inverni piovosi e miti per la vicinanza del mare ed estati asciutte. Le temperature sono mediamente elevate, l'escursione termica annua è limitata (generalmente inferiore a 20 °C). Le precipitazioni, soprattutto invernali, sono spesso molto intense, ma di breve durata. L'associazione vegetale tipica è la **macchia mediterranea**, costituita da arbusti e alberi sempreverdi (per esempio, leccio, quercia da sughero, pino marittimo, alloro), capaci di sopravvivere ai lunghi periodi secchi; questa vegetazione spontanea è oggi notevolmente ridotta. Oltre alle **coste del Mediterraneo**, questo clima caratterizza anche le **regioni**

La macchia mediterranea

più meridionali dell'Africa e dell'Australia, le coste della California e il tratto centrale della costa cilena.

Il **clima temperato fresco** caratterizza la fascia compresa tra i 35° e i 60° di latitudine N e i 35° e i 60° di latitudine S, interessata dai venti occidentali; comprende **due sottotipi**, quello **oceanico**, con precipitazioni (tra 700 e 1500 mm annui) uniformemente distribuite nell'arco dell'anno e minori escursioni termiche annuali, e quello **continentale**, con precipitazioni concentrate in una stagione ed escursioni termiche annuali più accentuate. La temperatura media del mese più freddo supera di poco 0 °C e quella del mese più caldo è di circa 15 °C: dunque, gli inverni sono miti e le estati fresche, soprattutto per il sottotipo oceanico. La vegetazione, rigogliosa, è rappresentata da **foreste di latifoglie** (per esempio, querce, castagni, ontani, tigli, aceri, olmi e betulle), con un ricco sottobosco. Il **sottotipo oceanico interessa le coste atlantiche dell'Europa, l'Inghilterra, l'Irlanda, la costa pacifica del Nordamerica, quella meridionale del Cile e della Nuova Zelanda**, mentre il **sottotipo continentale interessa il nord della Cina, della Corea e del Giappone e gli stati nordorientali degli Stati Uniti**.

Clima temperato fresco

Foresta di latifoglie

## 18.7 I climi microtermici

All'interno di questo gruppo climatico, caratterizzato da estati brevi e fresche e da inverni lunghi e freddi, si distinguono **tre tipi climatici**: il **clima temperato-freddo umido** e il **clima temperato-freddo secco**.

Tre tipi climatici

Il **clima temperato-freddo umido** è detto anche **clima freddo a estate calda**, perché in questa stagione la temperatura media è di circa 22 °C; si estende tra 45 e 60° di latitudine Nord, mentre mancano zone con questo clima nell'emisfero australe. Le precipitazioni sono distribuite in tutto l'arco dell'anno, ma con maggior intensità in estate. L'associazione vegetale tipica è la **foresta di latifoglie decidue** (che perdono tutte le foglie nella stagione fredda), in cui le specie arboree più rappresentate sono faggi e querce, insieme ad aceri, carpini, castagni, ontani, pioppi, tigli ecc. Dove le precipitazioni sono meno abbondanti (aree continentali) alla foresta si sostituisce invece la **steppa-prateria**, un'associazione vegetale di erbe perenni e pochi arbusti, che occupano spesso vaste estensioni. Tuttavia, sia la foresta di latifoglie, sia la steppa-prateria, diffuse soprattutto nelle **aree continentali del Nordamerica, dell'Europa e dell'Asia**, sono oggi notevolmente ridotte, perché spesso sostituite dall'uomo con campi coltivati.

Clima temperato-freddo umido

Foresta di latifoglie decidue

Steppa-prateria

Clima temperato-freddo secco

Il **clima temperato-freddo secco**, detto anche **clima freddo a inverno prolungato** (oltre gli otto mesi), si estende al di sopra della fascia precedente fino al circolo polare. Le precipitazioni sono scarse e concentrate soprattutto in estate; quelle invernali, nevose, rimangono a lungo sul suolo ghiacciato. L'associazione vegetale caratteristica è la **foresta di aghifoglie** (detta anche taiga in Siberia), in cui le specie più rappresentate sono pini, abeti e larici, talora associati a qualche specie di latifoglie, quali betulle, pioppi e salici. Questo clima si trova in **Finlandia e Scandinavia** (Europa), in **Siberia** (Asia) e in **Canada e Alaska** (America).

Foresta di aghifoglie

## 18.8 I climi nivali

I **climi nivali** si estendono a **nord del Circolo Polare Artico** e sono caratterizzati, oltre che da una temperatura media inferiore ai 10 °C nel mese più caldo, da scarse precipitazioni (soprattutto a carattere nevoso), a causa del persistere dell'alta pressione sul polo e di una scarsa umidità atmosferica; comprendono due tipi climatici: il clima della tundra e il clima polare.

Clima subpolare, o della tundra

Il **clima subpolare** è detto anche **clima seminivale**, o della **tundra**; durante l'estate, breve e fresca, lo strato più superficiale del suolo, che per il resto dell'anno è gelato, sgela, permettendo la crescita di poche specie vegetali, soprattutto erbacee; lo strato più profondo del suolo rimane, invece, ghiacciato e costituisce il cosiddetto **permafrost** (permanentemente gelato). L'associazione vegetale tipica di questo clima è la **tundra**, in cui sono presenti prevalentemente erbe, muschi e licheni e solo sporadicamente qualche betulla o salice di pochi decimetri di altezza. Nell'emisfero boreale, il clima subpolare interessa il **nord della Siberia**, le **isole del mar Glaciale Artico**, il **Nordamerica**, dall'**Alaska** al **Labrador**; nell'emisfero australe solo alcune **isole** più vicine all'Antartide, **quali le Falkland e le Orcadi**.

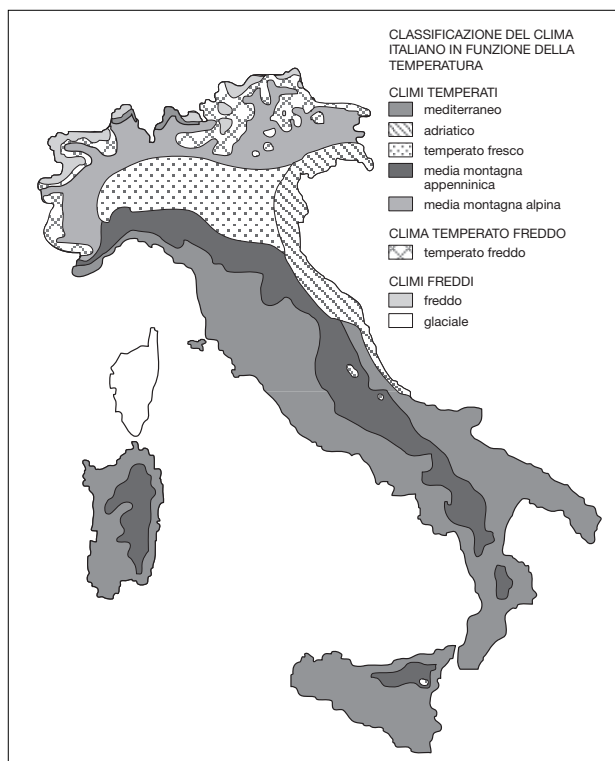
Il permafrost e la tundra

Clima polare

Il **clima polare** è detto anche **clima nivale** ed è tipico delle **calotte glaciali della Groenlandia e dell'Antartide**; in tutto l'anno non si superano mai gli 0 °C e il suolo rimane perciò permanentemente coperto di neve e ghiaccio. Le precipitazioni sono scarse, ma si accumulano completamente. La vegetazione è assente.

## 18.9 Il clima in Italia

L'Italia è compresa nella fascia dei climi **mesotermici**; tuttavia, a causa della sua estensione in latitudine, della sua oro-



**Figura 18.2**  
La distribuzione  
dei climi in Italia.

grafia e dell'azione del mare che la circonda su tre lati presenta una notevole varietà di climi locali, che possono essere raggruppati in tre tipi fondamentali – **climi di montagna, clima continentale e climi mediterranei** – articolati a loro volta in vari sottotipi (fig. 18.2).

### ■ I climi di montagna

Interessano la **catena alpina** e le parti più interne degli **Appennini**. Sono caratterizzati da **forti escursioni termiche**, sia annuali, sia giornaliere. **Le precipitazioni sono mediamente abbondanti**, spesso a carattere nevoso: sulle Alpi esse variano da est verso ovest, diminuendo via via che ci si sposta dalle Alpi orientali verso quelle occidentali: raggiungono valori minimi sulle Alpi Cozie, ma tornano ad aumentare sulle Alpi Marittime e Liguri per la vicinanza del Mar Li-

gure. Lungo gli Appennini, invece, le precipitazioni diminuiscono spostandosi da nord verso sud.

### ■ Il clima continentale

Il clima continentale, tipico della pianura Padana, è caratterizzato da forte escursione termica annuale, pari a circa 20 °C. Esso presenta due massimi di precipitazione (primavera e autunno) e due minimi (estate e inverno). L'umidità relativa è elevata a causa dell'intensa evapotraspirazione, dovuta sia all'abbondanza delle acque circolanti in superficie (laghi, fiumi e canali), sia ai tipi di coltura praticati (risaie). Il carattere continentale del clima della pianura Padana varia in funzione della distanza dal mare: pertanto, esso è più accentuato a ovest e meno verso est, avvicinandosi al mare Adriatico.

### ■ I climi mediterranei

Fortemente caratterizzati dall'influenza del mare, esistono 4 sottotipi di climi mediterranei:

Clima della Liguria e della Toscana settentrionale

● **clima della Liguria e della Toscana settentrionale.** È un clima caldo in estate e mite in inverno, con escursioni termiche annue molto modeste. Le precipitazioni annue variano da valori minimi nella parte occidentale della costa ligure a valori più elevati su quella orientale e lungo la costa tirrenica;

Clima del versante tirrenico e ionico

● **clima del versante tirrenico e ionico.** Le precipitazioni sono relativamente abbondanti, in particolare dove sono presenti dei rilievi alle spalle del litorale. Le piogge si verificano essenzialmente in inverno: in questa stagione non sono rare precipitazioni di breve durata, mai di grande intensità, che influenzano profondamente il regime dei fiumi, cioè le variazioni della loro portata d'acqua nel corso dell'anno;

Clima del basso Adriatico

● **clima del basso Adriatico.** È particolarmente caldo e secco in estate, poiché le masse d'aria umida provenienti dall'oceano Atlantico, hanno scaricato la loro umidità sul versante tirrenico e sono ormai secche;

Clima delle isole

● **clima delle isole.** È caratterizzato da estati lunghe, calde e aride, e da inverni brevi e umidi, con precipitazioni che possono interessare parzialmente anche la primavera; le scarse precipitazioni creano problemi di approvvigionamento idrico. Nelle zone interne e più elevate delle isole, il carattere mediterraneo del clima si riduce e acquista, invece, caratteristiche di continentalità. Infine, sui rilievi più elevati (per esempio, sull'Etna), il clima presenta aspetti tipici del clima di montagna.

## GLOSSARIO

**Clima**

Complesso delle condizioni meteorologiche che mediamente caratterizzano una regione nel corso di un anno, stabilite in base a rilevazioni effettuate in un lungo arco di tempo (almeno 30 anni).

**Climatologia**

Branca della geografia fisica che studia i vari fattori fisici e chimici che determinano un clima, i loro reciproci rapporti, la loro influenza sull'ambiente fisico e biologico, le variazioni che subiscono in relazione alle condizioni geografiche.

**Escursione termica**

Differenza tra la temperatura massima e minima di una regione misurate in un de-

terminato intervallo di tempo (giorno, mese o anno).

**Fronte**

Linea lungo la quale la superficie che separa due masse d'aria convergenti, aventi caratteristiche fisiche diverse, interseca la superficie terrestre; lungo queste superfici si sviluppano i principali sistemi di perturbazioni atmosferiche.

**Meteorologia**

Scienza che studia l'atmosfera e i fenomeni che in essa hanno sede.

**Tempo**

Insieme delle condizioni meteorologiche che caratterizzano una data regione in un determinato momento.

## TEST DI VERIFICA

**1** L'insieme degli elementi che caratterizzano lo stato dell'atmosfera in una data regione in un determinato momento si dice:

- a clima;
- b tempo cronologico;
- c tempo meteorologico.

**2** In un fronte freddo la massa di aria fredda:

- a si sovrappone alla massa di aria calda;
- b provoca la discesa di aria calda;
- c si insinua sotto la massa di aria calda;
- d nessuna delle precedenti.

**3** Quale tra i seguenti non è un fattore del clima?

- a latitudine;
- b altitudine;
- c distanza dal mare;
- d temperatura.

**4** Quale tra i seguenti tipi di clima non fa parte dei climi megatermici?

- a clima equatoriale;
- b clima monsonico;
- c clima della savana;
- d clima sinico.

**5** A quale gruppo climatico appartiene il clima mediterraneo?

- a climi mesotermici;
- b climi aridi;
- c climi megatermici;
- d climi microtermici.

R

1 c; 2 c; 3 d; 4 d; 5 a.

# 19 Idrosfera: le acque marine

L'insieme delle acque presenti sulla Terra prende il nome di **idrosfera**: per la maggior parte essa è formata da **mari e oceani**, che **coprono circa tre quarti della superficie terrestre**; la scienza che studia gli oceani e i mari dal punto di vista geomorfologico, chimico-fisico e biologico è l'**oceanografia**. Le **caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua di mare**, quali la salinità, la densità, la temperatura, la pressione, il colore e la trasparenza, influenzano alcuni fenomeni che in essa si verificano e anche la vita degli organismi che vi abitano. Le acque oceaniche e marine sono sottoposte a diversi tipi di movimenti: costanti, le **correnti**; irregolari, le **onde**; periodici, le **maree**. Le numerose esplorazioni oceanografiche degli anni '60 e '70 hanno permesso di descrivere la **morfologia dei fondali marini**, alquanto varia e complessa.

## 19.1 Oceani e mari

L'acqua è presente sulla Terra nei tre stati fisici: liquido (nei mari, negli oceani, nei laghi, nei fiumi ecc.), solido (nei ghiacciai) e aeriforme (vapor d'acqua nell'atmosfera). Tutte le acque presenti sulla Terra costituiscono una sorta di involucro a cui si dà il nome di **idrosfera**: la maggior parte dell'idrosfera è costituita da oceani e mari, che nel loro complesso occupano oltre il 70% della superficie terrestre. Più precisamente, si indica col termine **oceano** un'ampia distesa di acque che circonda e separa le masse emerse dei continenti, mentre il termine **mare** è riservato a estensioni più limitate di masse d'acqua, generalmente circondate da terre emerse o comunque adiacenti a esse (in alcuni casi il termine mare indica bacini chiusi, per esempio, il Mar Caspio, che non comunicano direttamente con i mari aperti).

La scienza che studia gli oceani e i mari dal punto di vista morfologico, chimico, fisico e biologico è l'**oceanografia**: essa si occupa della morfologia dei fondali oceanici, della natura e del tipo di sedimenti che vi si depositano, delle caratteristiche fisiche e chimiche delle acque e dei loro movimenti, nonché delle interazioni fra oceani e atmosfera. Come si è visto nel capitolo 12, le esplorazioni oceanografiche hanno inoltre permesso di raccogliere molte informazioni sulla struttura dei fondali oceanici, che hanno contribuito alla formulazione della teoria della tettonica delle placche.

Oceano

Mare

L'oceanografia

## 19.2 Le caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua di mare

Molte sono le caratteristiche chimico-fisiche dell'acqua di mare che influenzano alcuni fenomeni che in essa si verificano e la vita degli organismi che vi abitano; tra queste si segnalano: la salinità, la densità, la temperatura, la pressione, il colore e la trasparenza delle acque.

La **salinità indica la quantità di sali** (presenti in forma ionica) **disciolti nelle acque marine** e provenienti dal costante apporto di sostanze saline da parte dei fiumi che scorrono sulle terre emerse e anche dei vulcani sottomarini. La salinità si esprime in grammi di sali disciolti in 1 kg di acqua e ha un valore medio del 35‰ (per mille): cioè, se si fa evaporare 1 kg di acqua di mare, rimangono 35 g di sali. **La salinità varia da zona a zona in funzione di fattori quali l'evaporazione, l'apporto di acqua dolce** proveniente dai continenti, **le precipitazioni**; per esempio, in superficie la salinità è maggiore nelle zone calde tropicali, dove l'evaporazione è intensa (tocca il 43‰ nel Mar Rosso) oppure dove si formano ghiacci marini; risulta minore nei mari freddi (tocca il 7‰ nel Mar Baltico) e nelle zone calde equatoriali a causa delle frequenti e abbondanti precipitazioni che tendono a diluire i sali contenuti. **La presenza di sali** in soluzione, inoltre, **abbassa il punto di congelamento dell'acqua**: con una salinità del 35‰, la temperatura di congelamento scende da 0 °C a -1,9 °C. Tra i numerosi sali disciolti nelle acque di mare il più abbondante è il cloruro di sodio, il comune sale da cucina; seguono i sali di magnesio, di calcio e di potassio (tab. 19.1).

Oltre ai sali, le acque contengono disciolti anche numerosi gas, gli stessi che formano l'atmosfera: tra essi, di fon-

Salinità

**Tabella 19.1** I principali sali contenuti mediamente in 1 kg di acqua di mare

SALI	g/kg
cloruro di sodio	27,123
cloruro di magnesio	3,807
solfato di magnesio	1,658
solfato di calcio	1,260
solfato di potassio	0,863
carbonato di calcio	0,123
bromuro di magnesio	0,076
Totale	35,000



damentale importanza per la respirazione degli organismi viventi è l'**ossigeno**, la cui concentrazione (in mg/l) varia con la profondità e con la temperatura. La quantità di ossigeno disciolto nelle acque aumenta al diminuire della temperatura (infatti, la solubilità dei gas in un liquido aumenta al diminuire della temperatura del liquido) e diminuisce con la profondità, raggiungendo un minimo a circa 1000 m; nelle acque profonde l'ossigeno tende nuovamente ad aumentare a causa delle basse temperature e per la scarsità degli organismi consumatori di ossigeno (fig. 19.1 a).

La **densità** dell'acqua di mare, che in media è di circa  $1,02 \text{ g/cm}^3$  a  $4^\circ\text{C}$ , **aumenta all'aumentare della salinità e della pressione** (profondità) **e al diminuire della temperatura**: lo strato in corrispondenza del quale si verifica un rapido aumento della densità, compreso tra circa 200 e 100 m di profondità, è detto **picnoclino**. Le acque del Mediterraneo sono molto dense, pur avendo temperature elevate, poiché l'evaporazione è intensa e l'apporto salino delle acque continentali è limitato.

La **temperatura varia in funzione della latitudine, della stagione e della profondità**. La temperatura massima viene registrata in superficie, nelle zone equatoriali, e diminuisce di circa  $1^\circ\text{C}$  per ogni grado di aumento della latitudine. La temperatura diminuisce anche con la profondità, poiché le radiazioni infrarosse, quelle che riscaldano le acque, penetrano solo nelle acque superficiali (non oltre i 10 m di profondità); tra i 200 e i 1000 m si verifica una brusca diminuzione di tem-

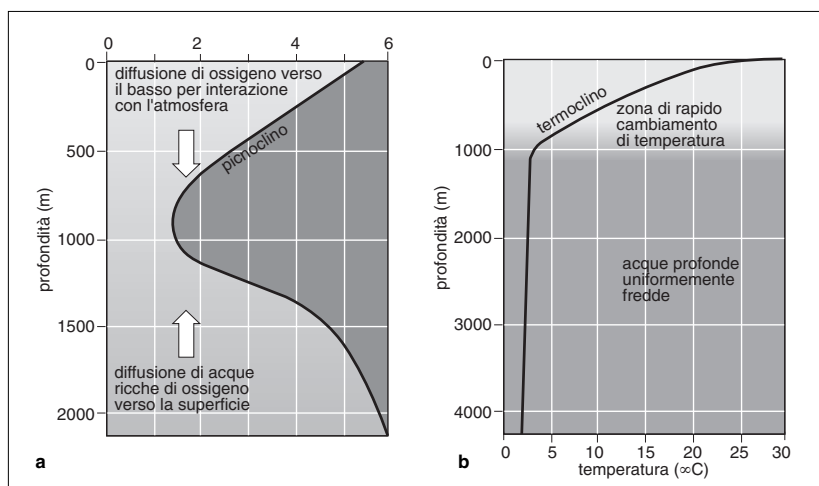
Densità

Picnoclino

Temperatura

**Figura 19.1**

Concentrazione dell'ossigeno (a) e andamento della temperatura (b) in funzione della profondità.



peratura: a questo strato si dà il nome di **termoclino**; la temperatura si stabilizza poi in profondità su valori vicini agli 0 °C (fig. 19.1 b). Le differenze di temperatura e di densità a diversi livelli possono provocare la formazione di moti convettivi alle varie latitudini, con conseguente rimescolamento delle acque, ciò che influenza la distribuzione degli organismi.

Termoclino

La **pressione** esercitata dall'acqua, detta **pressione idrostatica**, aumenta con l'aumentare della profondità, con un **incremento di circa 1 atmosfera per ogni 10 m**. Sui fondali oceanici si registrano pressioni elevatissime; tuttavia, gli animali che popolano gli abissi non ne rimangono "schiacciati", poiché compensano l'elevata pressione con un'uguale pressione esercitata dai loro liquidi interni. Relativamente alla capacità di sopportare variazioni della pressione idrostatica, gli **organismi si distinguono in stenobati** (meno tolleranti alle variazioni) ed **euribati** (più tolleranti alle variazioni).

Pressione idrostatica

Il **colore** dell'acqua di mare, prevalentemente azzurro-blu, ma con variazioni al verde e al viola, è dovuto alla diffusione della luce prodotta dalle stesse molecole d'acqua, che hanno dimensioni così piccole che assorbono le radiazioni con lunghezza d'onda maggiore (come il rosso) e lasciano passare quelle con lunghezza d'onda minore (come il blu). Variazioni di colore possono essere determinate anche dalla presenza di particelle organiche e inorganiche in sospensione nell'acqua.

Colore

La **trasparenza** delle acque, cioè la capacità di essere penetrate dalla luce, è quasi totale nei primi 50 m di profondità (**zona fotica**), mentre diminuisce gradualmente fino ai 200 m (**zona afotica**), oltre i quali tutte le radiazioni sono assorbite.

Trasparenza

### 19.3 Le variazioni di livello dei mari

Come accade per ogni liquido, la superficie libera dei mari a contatto con l'atmosfera tende a disporsi perpendicolarmente alla forza di gravità in ogni suo punto, coincidendo in pratica con quella del geoide, termine col quale si indica la forma della Terra (v. cap. 5). Il livello di tale superficie, definito come **livello medio marino**, costituisce il riferimento per la misurazione altimetrica delle terre emerse e anche delle profondità marine; esso viene assunto come la risultante della media delle misure effettuate di norma per un periodo ventennale mediante strumenti fissi, detti idrometri, ubicati in determinati punti di una linea di costa.

Livello medio marino

**Nel corso del tempo, il livello medio del mare è ripetutamente variato**, specialmente durante l'era quaternaria (v.

cap. 16), in conseguenza dei frequenti mutamenti climatici e dell'alternarsi delle glaciazioni, con abbassamenti (**regressioni**) di oltre 100 m rispetto al livello attuale durante l'ultima glaciazione o risalite (**trasgressioni**) di alcune decine di metri in corrispondenza dei periodi interglaciali. In epoca storica, negli ultimi due millenni, relativamente alle coste italiane, si è accertata una generale risalita del livello medio marino di 1-2 m.

## 19.4 Le correnti marine

Le correnti marine sono movimenti costanti delle acque, paragonabili a grandi fiumi che scorrono attraverso gli oceani a velocità comprese tra 2 e 10 km/h e che si distinguono dalle acque circostanti per temperatura e salinità.

Le correnti possono avere origine diversa: possono essere dovute all'azione combinata dei venti e delle differenze di pressione atmosferica oppure essere innescate dalle maree oppure ancora dipendere dalle differenze di densità dell'acqua del mare, causate, per esempio, dal diverso riscaldamento delle varie parti degli oceani e da diversi valori di salinità.

Le correnti marine possono svilupparsi sia in superficie (**correnti superficiali**), sia in profondità (**correnti profonde**) e si distinguono in:

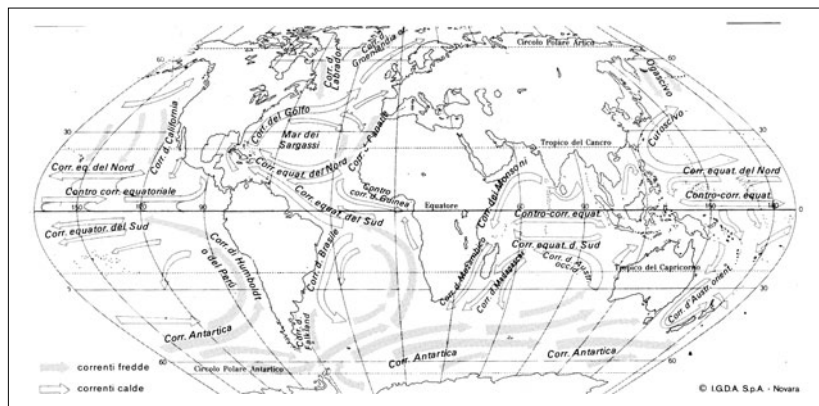
- **correnti calde**, se hanno una temperatura maggiore di quella delle acque circostanti (che interessano il lato occidentale dei continenti);
- **correnti fredde** (che interessano il lato orientale dei continenti) nel caso contrario (fig. 19.2).

Origine

Tipi di corrente

### Figura 19.2

Le principali correnti oceaniche.



Nel loro insieme, le correnti stabiliscono un **circuito oceanico**, cioè producono un moto ciclico delle acque marine, che compiono lunghi percorsi chiusi all'interno di uno stesso bacino oceanico. Le masse d'acqua alle latitudini polari hanno densità maggiore a causa dei forti raffreddamenti e tendono a precipitare in profondità; espandendosi sui fondali marini, si muovono verso latitudini con temperature più elevate. Lo sprofondamento dell'acqua polare richiama superficialmente altra acqua proveniente da latitudini inferiori. Le acque calde superficiali delle basse latitudini galleggiano in superficie e vengono così trasportate a latitudini più elevate, dove si raffreddano, diventano più dense e affondano, ripetendo così il ciclo.

Il circuito oceanico

Le correnti marine svolgono un ruolo molto importante nel trasferimento di calore dalle regioni tropicali alle regioni polari, esercitando una **funzione mitigatrice del clima**: infatti, trasportando acqua calda dalle basse alle alte latitudini, esse innalzano la temperatura dell'atmosfera, alla quale cedono parte del loro calore. Così, per esempio, durante l'inverno i porti della Norvegia sono liberi dai ghiacci, proprio perché la calda Corrente del Golfo lambisce le coste norvegesi recandovi le tiepide acque dell'Atlantico centrale; invece, la penisola canadese del Labrador, a latitudini poco più basse della Norvegia, ha porti chiusi dai ghiacci per la maggior parte dell'anno, perché nessuna corrente calda viene a lambirne le coste e risente invece dell'influsso della fredda Corrente del Labrador, che porta verso sud le fredde acque artiche.

Funzione mitigatrice del clima

La **presenza delle correnti** può essere **individuata attraverso satelliti artificiali** dotati di **apparecchiature sensibili ai raggi infrarossi** (radiazioni termiche) emessi dalla superficie degli oceani: queste apparecchiature registrano la temperatura, e quindi il percorso delle correnti, distinguendo le zone degli oceani con differenti temperature.

## ■ Correnti superficiali

Le **cause primarie** della circolazione superficiale delle acque sono i **venti**, che trascinano nel loro movimento le masse d'acqua alla superficie degli oceani, e l'**energia del Sole**, che riscalda maggiormente le zone comprese fra i tropici; le acque vengono messe in movimento dall'energia che il vento, per attrito, cede allo strato superficiale delle acque stesse. Le correnti superficiali sono limitate ai primi 200 m di profondità. L'andamento delle correnti superficiali è influenzato dalla **forza di Coriolis** (v. a p. 217): le correnti oceaniche sono deviate verso destra, rispetto alla loro direzione ideale di movimento, nell'emisfero settentrionale e verso sinistra nell'e-

Cause primarie: venti ed energia solare

La forza di Coriolis

La Corrente  
del Golfo

misfero meridionale; il percorso delle correnti può essere influenzato anche dalla presenza di ostacoli, come dorsali oceaniche e continenti.

Le più note correnti superficiali includono la **Corrente del Golfo**, che si forma dalla corrente nord-equatoriale, il cui motore è l'aliseo tropicale. Essa si origina nel Golfo del Messico, alla confluenza della corrente delle Antille con quella di Florida. La corrente costeggia dapprima le coste sud-orientali degli Stati Uniti, poi attraversa l'Atlantico del nord, lambisce la costa delle isole britanniche, della penisola scandinava e si dirige verso l'Islanda. Lungo il percorso, un braccio piega verso sud, in direzione delle Canarie, poi verso ovest e ritorna al Golfo del Messico, chiudendo il circuito.

Lungo le coste orientali dei continenti, in particolare lungo le coste della California e del Perù, quando il vento soffia verso l'Equatore parallelamente alla costa provoca un movimento dell'acqua superficiale verso il largo (a causa dell'effetto di Coriolis): la massa d'acqua che si allontana dalla costa viene rimpiazzata da acqua che risale dagli strati sottostanti, determinando il fenomeno della **risalita di acque profonde** (noto anche col termine inglese di **upwelling**), che riveste grande importanza biologica. Infatti, le acque profonde che vengono richiamate in superficie sono ricche di sostanze nutrienti che giacevano sul fondo e che vengono così immesse nel ciclo biologico della vita marina.

Upwelling

### ■ Correnti profonde

Le cause

La circolazione oceanica di profondità dipende essenzialmente dalla **forza di gravità** ed è provocata da  **differenze di densità** delle acque; poiché l'acqua fredda e salata è più densa e perciò più pesante di quella più calda e meno salata, tende a sprofondare e a scorrere sotto quella più leggera: le correnti di questo tipo sono dette **correnti di gradiente** o **correnti di densità**. Per tale motivo, la circolazione oceanica profonda è detta anche **circolazione termoalina** (dal greco *thermós*, caldo e *alós*, sale), cioè causate dalla diversa temperatura e salinità. Il tempo necessario affinché le acque dalla superficie scendano in profondità e poi risalgano varia in media dai 500 ai 2000 anni.

Correnti di gradiente  
e circolazione  
termoalina

Le masse d'acqua profonde si classificano a seconda della regione d'origine e della profondità alla quale scorrono: le correnti di densità interessano in particolare il Mediterraneo e le regioni polari, dove le acque superficiali fredde e salate hanno elevata densità e si inabissano fino a raggiungere il fondo oceanico. Dalle zone polari artiche e antartiche si crea quindi un flusso sul fondo oceanico verso latitudini minori.

## 19.5 Le onde

Le onde sono movimenti irregolari della superficie marina, che non si avvertono a profondità superiori ai 200 m. Le onde non producono spostamenti orizzontali dell'acqua, ma solo un'oscillazione, lungo un'orbita circolare o ellittica, delle particelle d'acqua. Esse possono originarsi a causa della spinta del vento sulla superficie marina (ma anche in seguito a maree, movimenti sismici, frane sottomarine o perturbazioni atmosferiche violente) e possono, inoltre, propagarsi a migliaia di chilometri di distanza dal luogo di origine (**onde senza vento**).

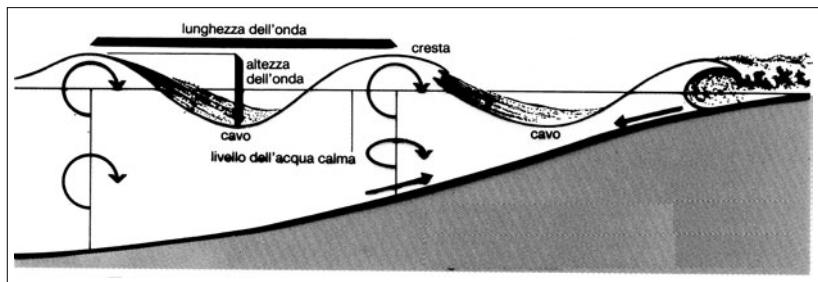
Quando il vento spira sul mare, esercita sulla superficie esposta una pressione proporzionale all'intensità con cui soffia. Poiché il liquido è incompressibile, si deprime, dando origine a un **cavo** (o **ventre**) d'onda. Le particelle prima contenute nel cavo si spostano sopravento e danno origine a una **cresta rilevata**. In persistenza del vento, cavi e creste si susseguono paralleli, creando un treno d'onda (**onde forzate**). In un'onda si riconoscono i seguenti parametri (fig.19.3):

- **lunghezza d'onda** (L), distanza esistente fra due creste o due cavi successivi;
- **altezza dell'onda** (H), dislivello esistente fra la sommità di una cresta e il fondo del cavo;
- **periodo dell'onda** (T), tempo che intercorre tra il passaggio in uno stesso punto di due creste o due cavi successivi;
- **profondità dell'onda**, punto più basso al di sotto della superficie nel quale si avverte il movimento dell'acqua (pari a  $L/2$ ). In mare aperto, dove non si avverte l'influenza dei fondali, il moto si propaga verso il basso per attrito fra le singole particelle, che compiono orbite circolari "impilate" sulla stessa verticale, con diametro sempre più ridotto scendendo in profondità, fino all'estinzione. Le onde non comportano lo spostamento di masse d'acqua, poiché le particelle, nel lo-

Ventre e cresta  
delle onde

Lunghezza, altezza,  
periodo, profondità

**Figura 19.3**  
Parametri fisici  
di un'onda e formazione  
di un frangente.



Onde di oscillazione      ro moto circolare, tornano periodicamente al punto di partenza (**onde di oscillazione**). Se le coste sono basse, tanto che la profondità dell'onda diventa superiore alla profondità del fondale, le orbite circolari descritte dalle particelle si deformano diventando ellittiche. La base dell'onda viene rallentata dall'attrito e si trova in ritardo rispetto alla cresta. Il fenomeno si accentua finché quest'ultima si rovescia su se stessa creando i **frangenti di spiaggia (onda di traslazione)**. Il movimento effettivo di masse d'acqua, detto **risacca**, si manifesta con un movimento di avanzata e di ritiro dell'onda sulla battigia. L'energia cinetica di un'onda, funzione della velocità, è in grado di compiere un lavoro che cresce all'aumentare della massa dell'onda stessa e che sulla costa produce un processo erosivo (v. cap. 21) oppure provoca l'accumulo di nuovo materiale prelevato dal mare in un altro punto della costa.

### ■ Tipi d'onda

Onde morte, o lunghe      La genesi e le specifiche fisiche permettono di distinguere: ● **onde morte**, o **lunghe**, che si propagano in assenza di vento. La loro origine può essere lontanissima. Fra le più note ricordiamo quelle che provengono dai mari antartici e che, per effetto della rotazione terrestre, investono le coste occidentali dei continenti nell'emisfero australe fin dentro le zone di calma equatoriale;

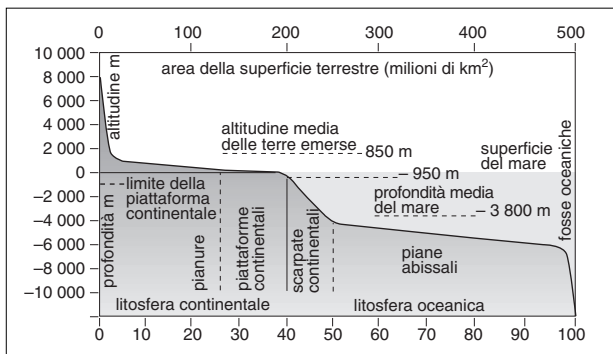
Onde di tempesta      ● **onde di tempesta**, sollevate dagli uragani e dai cicloni. Dotate di alta energia, assumono direzioni molto variabili in rapporto all'irregolarità del vento. Possono avere effetti distruttivi sia sulle coste, sia sulle navi in mare aperto;

Tsunami      ● **tsunami**; si tratta di onde atipiche, altissime, provocate da un maremoto che scuote il fondale e trasmette l'energia all'acqua soprastante: queste onde investono la costa con grande violenza, dovuta sia alla massa dell'acqua coinvolta, sia alla velocità del movimento.

## 19.6 La morfologia dei fondali oceanici

L'esplorazione dei fondali oceanici ha ricevuto un notevole impulso dalle numerose spedizioni avvenute negli anni '60 e '70: essa ha rivelato l'esistenza di "paesaggi" alquanto vari e complessi, fino ad allora sconosciuti, almeno alle maggiori profondità.

Piattaforma continentale e scarpata      Procedendo dalla linea di costa verso il fondo, si estende, per un tratto più o meno breve, la **piattaforma continentale** (in genere fino all'isobata dei 200 m), seguita da una **scarpata** più o meno declive (con pendenza media dai 3° ai



**Figura 19.5**  
Morfologia del fondale marino.

5°), che scende fino alle **piane abissali** (oltre i 3000-5000 m di profondità; fig. 19.5). Queste ultime, a loro volta, possono essere percorse da vere e proprie catene montuose (le **dorsali oceaniche**), corrispondenti alle zone di risalita dei magmi, o costellate di rilievi isolati, a volte emergenti a formare singole isole o arcipelaghi. Le piane abissali possono anche essere interrotte da profonde **fosse**, (che scendono fino ai 6000-11000 m di profondità), corrispondenti a grandi fratture litosferiche o a linee di subduzione al margine di due placche contrapposte (v. cap. 12).

Piane abissali

Dorsali oceaniche

Fosse

## I SEDIMENTI MARINI

All'interno delle masse marine e oceaniche è in atto una continua sedimentazione di materiali, prevalentemente costituiti da resti di organismi (generalmente con guscio o scheletro calcareo o siliceo, quando non vengono totalmente disciolti dall'acqua marina tra i 3500 e i 5500 m di profondità), che si accumulano sul fondo mescolandosi a detriti provenienti dalle scarpate continentali (dove arrivano apportati dai corsi d'acqua). In prossimità della scarpata continentale prevalgono sedimenti più grossolani (sabbie), mentre quelle più fini (argille) si depositano nelle zone più profonde (assieme a materiali di provenienza cosmica e vulcanica), dove si rinvencono anche con una certa frequenza concentrazioni di cosiddetti noduli di manganese, ciottoli di forma appiattita e di diametro medio di circa 5 cm, che si tro-

vano in abbondanza su vaste estensioni dei fondali oceanici: sono particolarmente ricchi di manganese oltre che di ferro, ma possono anche contenere rame, nichel e altri metalli. Anche se attualmente il loro recupero è assai costoso, i noduli potranno divenire nei prossimi decenni la principale fonte di approvvigionamento di molti minerali metallici.

Gli accumuli e i resti organici (derivati in gran parte da zone ricche di plancton, insieme degli organismi che si lasciano trasportare passivamente dalle correnti e dalle onde) danno luogo a estese formazioni di fanghi calcarei a globigerine (protozoi unicellulari) e fanghi silicei a radiolari (protozoi unicellulari) e diatomee (alghe unicellulari). La continua attività di sedimentazione negli oceani è alla base della formazione di rocce sedimentarie (v. cap. 9).



## GLOSSARIO

### **Circuito oceanico**

Moto ciclico delle acque marine, che, spostate da una sequenza di correnti, compiono lunghi percorsi chiusi all'interno di uno stesso bacino oceanico.

### **Corrente oceanica o marina**

Massa d'acqua che, all'interno di un oceano o di un mare, si muove verso una determinata direzione.

### **Corrente termalina**

Corrente marina che si muove molto lentamente sul fondo dei bacini per compensare gli squilibri termici e la salinità esistenti alle diverse latitudini di uno stesso oceano.

### **Frangente**

Onda in cui la cresta si rompe spumeggiando.

### **Marea**

Movimento periodico di innalzamento e abbassamento del livello del mare dovuto all'attrazione lunisolare sulla Terra.

### **Moto ondoso**

Moto oscillatorio che interessa le particelle idriche superficiali di uno specchio d'acqua.

### **Onda**

Movimento irregolare dell'acqua del mare (o di un lago) generato dal vento.

### **Regressione**

Processo di ritiro del mare dalla terraferma, dovuto a un abbassamento del livello marino o a un innalzamento delle terre già emerse.

### **Termoclino**

Strato compreso tra i 200 e i 1000 m di profondità, caratterizzato da una costante diminuzione di temperatura; esso tiene separate le acque superficiali da quelle profonde.

### **Trasgressione**

Processo di invasione da parte del mare di terre precedentemente emerse.

## TEST DI VERIFICA

**1** La salinità media dell'acqua marina è pari a:

- a 3,5%;
- b 35%;
- c 35‰;
- d 1%.

**2** L'attrito delle particelle di acqua sul fondo marino provoca:

- a onde senza vento;
- b onde di traslazione;
- c onde di oscillazione;
- d onde di tempesta.

**3** Il moto ondoso è un moto:

- a regolare;
- b irregolare;
- c periodico;
- d costante.

**4** Quali sono le principali cause delle correnti profonde?

- a forza di gravità;
- b energia solare;
- c densità;
- d vento.

**5** Le maree sono causate da:

- a energia solare;
- b vento;
- c densità;
- d attrazione lunisolare.

**R**

1 a, c; 2 b; 3 b; 4 a, c; 5 d.

# 20 Idrosfera: le acque continentali

*Di tutte le acque presenti sulla Terra, solo una piccola parte è presente sulle terre emerse, costituendo le **acque continentali**, dette anche **acque dolci** per il minor contenuto di sali disciolti rispetto alle acque dei mari.*

*Per azione dell'energia solare e della forza di gravità, le acque continentali passano continuamente dallo stato liquido a quello aeriforme nell'atmosfera e nuovamente ritornano sulla Terra, attraverso le precipitazioni, allo stato liquido (pioggia) o solido (neve): l'insieme di queste trasformazioni costituisce il **ciclo dell'acqua**.*

*I "serbatoi" in cui sono contenute le acque continentali sono i **fiumi**, corsi d'acqua con deflusso permanente che scorrono in alvei naturali; i **laghi**, masse d'acqua dolce raccolte in conche naturali o artificiali della superficie terrestre; i **ghiacciai**, masse di acqua allo stato solido originate dalla progressiva trasformazione della neve in ghiaccio. Nel loro insieme, fiumi, laghi e ghiacciai costituiscono le **acque superficiali**.*

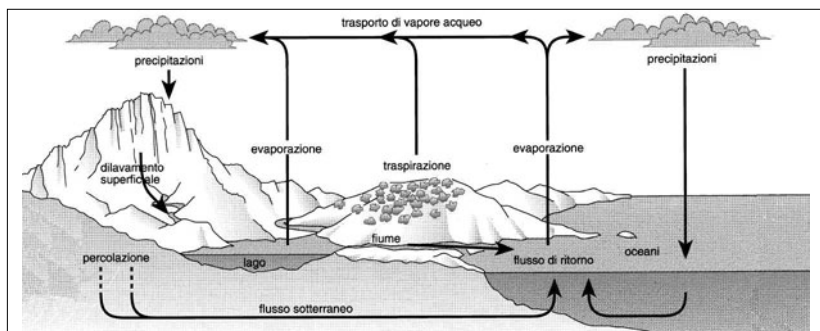
*Le **falde acquifere** che scorrono nel sottosuolo rappresentano, invece, le **acque sotterranee**, che possono affiorare in superficie e dare origine alle **sorgenti**.*

## 20.1 Il ciclo dell'acqua

L'insieme di tutte le acque del pianeta, nei diversi stati di aggregazione (solido, liquido e gassoso), costituisce l'**idrosfera**. Si stima che la quantità totale di acqua sulla Terra sia pari a 1,5 miliardi di km<sup>3</sup>: gli oceani e i mari (v. cap. 19) contengono il 97% delle risorse idriche della Terra; il resto è rappresentato dalle **acque dolci**, così chiamate per il minore contenuto di sali (circa 0,5%) rispetto a quello presente nelle acque marine (circa 3,5%), dette anche **acque continentali** essendo presenti sulle terre emerse. **La maggior parte delle acque dolci è "intrappolata" in ghiacciai, racchiusa in falde sotterranee e presente nell'atmosfera come vapore acqueo. Solo una piccola frazione è presente nei fiumi, nei laghi e negli organismi viventi.**

Tra questi diversi "serbatoi" avviene una continua circolazione di acqua: l'insieme dei processi che consente all'acqua di trasferirsi dagli oceani all'atmosfera, di raggiungere le terre emerse per poi tornare di nuovo agli oceani costituisce il **ciclo dell'acqua** (fig. 20.1.) Tale ciclo si realizza mediante variazioni dello stato fisico dell'acqua ed è costantemente alimentato dall'energia del Sole e dalla forza di gravità.

Dove sono le acque dolci



**Figura 20.1**  
Il ciclo dell'acqua.

Evaporazione  
e condensazione

La penetrazione  
nel suolo

Bilancio idrologico

Negli oceani l'acqua si trova allo stato liquido: il riscaldamento solare provoca l'**evaporazione** di una porzione dell'acqua superficiale che, trasformata in vapore, entra nell'atmosfera e può essere trasportata dai venti. Se una massa d'aria già satura d'umidità riceve altro vapore acqueo, o se la sua temperatura diminuisce, ha luogo la **condensazione** del vapore acqueo: in conseguenza di questo processo, possono poi verificarsi le precipitazioni, con le quali l'acqua allo stato liquido o solido raggiunge in parte i continenti e in parte ritorna direttamente agli oceani. L'acqua che cade sulle terre emerse deve effettuare un percorso spesso lungo e tortuoso, prima di tornare nuovamente agli oceani per azione della forza di gravità e chiudere così il ciclo.

Una porzione di quest'acqua penetra nel suolo per **infiltrazione** e in buona parte va ad alimentare le **falde sotterranee**; quest'acqua resta per un periodo più o meno lungo nel sottosuolo, dove dà origine al cosiddetto **deflusso profondo**, finché riaffiora nei fiumi o nelle sorgenti. Un'altra porzione dell'acqua di precipitazione che scorre sulla superficie terrestre e che, prima di tornare agli oceani, si concentra nei fiumi dà luogo, invece, a un **deflusso superficiale**. Una certa parte dell'acqua presente nel suolo torna direttamente nell'atmosfera mediante l'**evaporazione**; un'altra parte viene assorbita dalle radici delle piante e trasportata fino alle foglie per essere di nuovo liberata nell'atmosfera tramite la **traspirazione** che ha luogo attraverso le foglie: nel loro insieme, questi due processi prendono il nome di **evapotraspirazione**.

La quantità di acqua che ogni anno cade sul pianeta con le precipitazioni e quella che ritorna nell'atmosfera attraverso l'evaporazione e l'evapotraspirazione costituiscono il **bilancio idrologico**: a livello planetario esso è in pareggio, cioè

la quantità di acqua che cade sulla Terra è uguale a quella che ritorna nell'atmosfera; tuttavia, può presentare squilibri a livello regionale, in funzione del clima della zona: esistono, infatti, regioni a clima arido, in cui l'acqua che ritorna nell'atmosfera è maggiore di quella che cade attraverso le precipitazioni, e regioni in cui, invece, è maggiore la quantità di acqua ricevuta con le precipitazioni rispetto a quella persa con l'evaporazione e l'evapotraspirazione.

Di seguito descriviamo le caratteristiche dei diversi "serbatoi" in cui è presente l'acqua sulla Terra, iniziando dalle acque superficiali.

## 20.2 Le acque superficiali: i fiumi

Le acque superficiali comprendono i fiumi, di cui ci occupiamo in questo paragrafo, e i laghi, trattati nel prossimo.

L'acqua allo stato liquido, proveniente dalle precipitazioni e che giunge sulla superficie terrestre, può scorrere in superficie dando origine a "rivoletti" disordinati: essi costituiscono le cosiddette **acque dilavanti**, che a poco a poco si incanalano e confluiscono, formando corsi d'acqua di dimensioni via via maggiori detti nell'ordine ruscelli, torrenti e fiumi.

I **torrenti** contengono acqua solo in alcuni periodi dell'anno e sono invece in **secca** (assenza di acqua) in altri momenti.

I **fiumi** sono corsi d'acqua che scorrono entro alvei naturali con una modesta pendenza media e con deflusso d'acqua permanente. I fiumi possono essere alimentati dalle acque sotterranee, dalle precipitazioni e dallo scioglimento dei ghiacciai e, soprattutto a causa di questi ultimi due, durante l'anno possono avere **periodi di piena** (abbondanza d'acqua) o **periodi di magra** (scarsità d'acqua).

Nello sviluppo di un fiume si individuano tre parti distinte: il corso superiore, il corso medio e il corso inferiore.

- Il **corso superiore** va dalla sorgente, situata a quote elevate sul livello del mare, fino a una zona pianeggiante, seguendo la forza di gravità. In questo tratto la velocità delle acque è elevata e perciò il fiume esercita un'azione erosiva sulla superficie terrestre: scava il suo **letto**, o **alveo**, cioè la sede in cui scorrono le acque (v. riquadro a p. 260), e contemporaneamente costruisce i suoi argini, cioè i margini del letto. Col passare del tempo, il letto si rinforza sempre più e il fiume origina una vera e propria **valle fluviale**.

- Il **corso medio** si svolge in una zona pianeggiante. Allo sbocco in pianura, il fiume perde velocità e sedimenta parte dei materiali erosi nel corso superiore, formando una **pianura alluvionale**; in pianura il fiume scorre più lento, ma

Acque dilavanti

Torrenti

Fiumi

Corso superiore

Corso medio

## LA FORMA DELL'ALVEO

Il termine "alveo", o "letto", indica la sede entro cui scorrono le acque di un fiume e che esso stesso si scava grazie all'azione erosiva della corrente. In esso si distinguono le seguenti parti:

- il **letto d'inondazione** (o alveo maggiore) è la fascia potenzialmente inondabile dal fiume durante le piene storiche. Spesso, il prelievo di materiali (per esempio, sabbie e ghiaie) da un corso d'acqua da parte dell'uomo ha abbassato il piano di scorrimento della corrente, che fluisce incassata profondamente tra le sponde, in modo che l'esondazione delle acque risulta frenata. Gli interventi umani sono comunque recenti e i loro effetti non hanno ancora cancellato le forme naturali. Il profilo trasversale del letto d'inondazione ha una forma leggermente convessa;

- il **letto ordinario** (o alveo di piena) è il solco occupato dalla corrente durante le piene ordinarie, quelle che si ripetono a ogni autunno e primavera. È delimitato ai lati da due scarpate quasi verticali ben evidenti, che lo collegano con il piano più rilevato del letto d'inondazione. È formato da materiali grossolani, sedimentati dall'energia della corrente, maggiore nei momenti di grande portata. In genere, è poco colonizzato da vegetazione arborea, la cui crescita è impedita dalla ricorrenza delle alluvioni. La superficie del letto ordinario è irregolare, rimodellata dal continuo variare della dinamica del corso d'acqua;
- il **letto di magra** (o canale di scorrimento) è la fascia più profonda, occupata dalla corrente durante i periodi di magra. Non ha limiti ben netti verso il letto ordinario, nel quale divaga, talora concentrandosi in un solo canale, talora dividendosi in più bracci, intercalati da isolotti effimeri, rimaneggiati a ogni piena (fig. A).

### Figura A

Sezione trasversale di un alveo fluviale.



continua la sua azione erosiva sulle sponde e forma così ampie anse dette **meandri**.

### Corso inferiore

- Il **corso inferiore** è la parte terminale del fiume, in cui esso sbocca in un altro fiume, del quale è affluente, o in un bacino lacustre oppure in un mare o in un oceano. L'acqua dei fiumi, essendo meno densa e molto più leggera delle acque salate, scivola sopra le acque marine per un tratto, a volte anche rilevante, finché non si mescola completamente con esse. L'acqua marina, al contrario, si incunea sotto le acque dolci del fiume, risalendone in profondità una parte del corso.

### ■ Alcuni caratteri di un fiume

I caratteri utili per descrivere un fiume sono numerosi.

- La **lunghezza** è la distanza in km dalla sorgente alla foce;

### Lunghezza

può essere misurata o in linea d'aria o tenendo conto delle sinuosità del corso.

● La **larghezza** è la distanza media tra le due rive; si misura in metri. Larghezza

● La **pendenza** è data dal rapporto fra il dislivello misurato tra la sorgente e la foce e la lunghezza del fiume. Essa è elevata nel corso superiore del fiume e va diminuendo man mano che si passa dal corso medio a quello inferiore. Dalla pendenza di un fiume dipendono la velocità dell'acqua, il suo potere erosivo e la capacità di trasporto dei materiali erosi. In corrispondenza di bruschi dislivelli di pendenza si hanno le **cascate**, mentre in presenza di forti inclinazioni si originano le **rapide**. Pendenza

● La **velocità** viene espressa in metri percorsi nell'unità di tempo dalle acque di un fiume. Analogamente alla pendenza, essa varia lungo uno stesso fiume da pochi decimetri a qualche metro al secondo. È maggiore nel corso superiore del fiume e, per uno stesso tratto, diminuisce, in prossimità del fondo, a causa dell'attrito con le rocce sul fondo dell'alveo in superficie per l'attrito con l'aria e, lateralmente, per l'attrito con le sponde. La velocità massima si rileva al centro del fiume. L'andamento della velocità è importante, perché influenza le dimensioni delle particelle che l'acqua può trascinare con sé nel suo movimento verso valle. Velocità

● La **portata** rappresenta il volume di acqua che passa attraverso una sezione verticale del letto del fiume nell'unità di tempo, misurata in m<sup>3</sup>/sec. Essa può variare lungo il corso del fiume in base alle dimensioni della sezione; varia inoltre nel corso dell'anno in funzione delle precipitazioni e dello scioglimento dei ghiacciai. Portata

● Il **regime** indica le variazioni di portata nel corso dell'anno e dipende dal tipo di alimentazione del fiume, dalla distribuzione delle precipitazioni nell'arco dell'anno e dalla struttura geologica del terreno. Un fiume può avere **regime regolare**, cioè con una portata pressoché costante, se le piogge sono uniformemente distribuite durante l'anno, o **regime torrentizio** se, invece, si verificano notevoli variazioni nella portata a causa di una distribuzione non uniforme delle precipitazioni. Regime

● Il **bacino idrografico** è costituito dall'area che convoglia le acque dilavanti in uno stesso corso d'acqua. Bacini idrografici contigui vengono separati da una **linea spartiacque**, passante lungo le massime culminazioni topografiche. Tale delimitazione può non essere sempre esauriente, in quanto può intervenire anche la struttura geologica del sottosuolo a complicare la situazione (v. riquadro a p. 263). L'in- Bacino idrografico

Concentrazione  
di ossigeno  
e anidride carbonica

sieme di un fiume e dei suoi affluenti costituisce il **reticolo idrografico**.

● La **concentrazione di ossigeno e di anidride carbonica** è legata ai processi fotosintetici e respiratori degli organismi disciolti nel fiume. In prossimità della sorgente, il contenuto di ossigeno è elevato, mentre tende a diminuire in prossimità della foce, dove intervengono processi di decomposizione della sostanza organica.

### ■ Tipi di trasporto fluviale

Lungo il suo percorso, un fiume svolge un'azione erosiva delle rocce (v. cap. 21) e il materiale eroso può essere trasportato dalla corrente in vari modi, di seguito descritti.

Galleggiamento

● **Galleggiamento**: trasporto in superficie delle sostanze con peso specifico inferiore a quello dell'acqua (legno, pomici), o di quelle che restano a galla per tensione superficiale (minerali lamellari come alcune miche).

Sospensione

● **Sospensione**: riguarda i materiali solidi di grana fine (argille, limi e sabbie fini), che nel loro insieme formano la **turbida** e che sedimentano solo a velocità molto basse.

Soluzione

● **Soluzione**: è il trasporto che interessa tutti i sali minerali solubili disciolti nelle acque di un fiume.

Saltazione

● **Saltazione**: coinvolge le sabbie grossolane e ciottoli di piccole dimensioni. È più frequente sul fondo di letti ad alta rugosità, dove è favorita dalle irregolarità dell'alveo e dai moti turbolenti della corrente che ne derivano.

Rotolamento

● **Rotolamento**: riguarda ciottoli di medie dimensioni, che si spostano ruotando su se stessi a contatto con i materiali dell'alveo. Per attrito assumono la tipica forma del ciottolo fluviale, sferico e arrotondato.

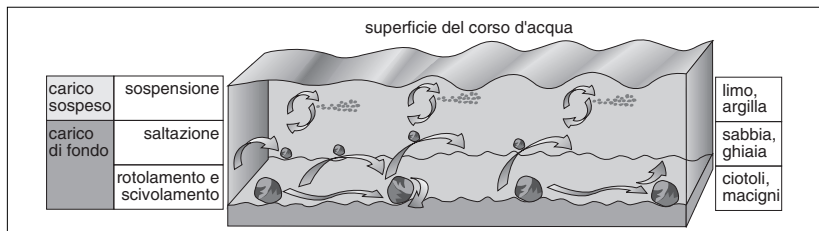
Trasporto di fondo

● **Trasporto di fondo**: coinvolge i sedimenti, che nei periodi di piena sono trascinati verso valle per distanze anche ragguardevoli.

### Figura 20.2

Le modalità di trasporto fluviale.

Sono frequenti forme di trasporto di tipo misto: per esempio, per saltazione alternata a sospensione, per rotolio e saltazione, per rotolio e trasporto di fondo (fig. 20.2).



## IL BACINO IDROGRAFICO

Per **bacino idrografico** di un fiume, detto anche bacino fluviale o bacino imbrifero, s'intende tutto il territorio che viene drenato da quel fiume e dalla rete dei suoi affluenti (esso, cioè, raccoglie tutte le acque dilavanti che confluiscono in quel fiume); il perimetro del bacino idrografico è segnato dalla **linea spartiacque**, la linea immaginaria che generalmente corre lungo il crinale dei rilievi montuosi (fig. A).

Una porzione di territorio le cui acque, a causa della distribuzione delle pendenze, scorrono verso il mare è detta zona esoreica. Esistono, però, anche zone endoreiche e areiche.

Nelle **zone endoreiche** le acque superficiali terminano in lagune o laghi interni non collegati al sistema oceanico, o scompaiono sotto terra. Esempio di tali zone sono i grandi bacini interni nordamericani o centro-asiatici (il sistema del Mar Caspio, del Lago d'Aral in Asia, del Giordano-Mar Morto in Israele, di molti dei laghi tettonici dell'Africa sudorientale) e i sistemi carsici (Carso triestino, Piani del Gran Sasso,

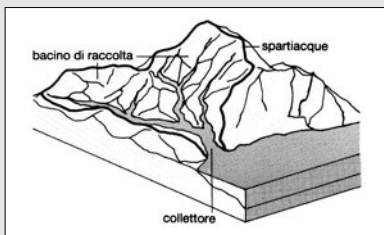
Murge pugliesi e lucane), dove le acque superficiali percolano nel sottosuolo ove alimentano un reticolo idrografico ipogeo (cioè sotterraneo).

Nelle **zone areiche**, invece, non esiste un reticolo idrografico; lo scorrimento in superficie è assente, eccetto che nei rari momenti di precipitazione (ne sono esempio i deserti).

I bacini idrografici possono avere dimensioni assai diverse: si passa dai 7 milioni di km<sup>2</sup> del Rio delle Amazzoni ai 75 000 del Po ai pochi ettari di certi corsi della Liguria; anche la lunghezza dei fiumi cambia notevolmente: il Nilo è lungo 6700 km, il Po 650 km, alcuni fiumi di risorgiva del Veneto poche decine di km.

### Figura A

Il bacino idrografico.



## ■ La foce dei fiumi: estuari e delta

La foce di un fiume, cioè la zona in cui esso confluisce in mare, può assumere forme diverse a seconda della deposizione dei materiali che davanti a essa il fiume stesso ha eroso e trasportato e anche in funzione del moto ondoso, delle correnti marine e dell'entità delle maree, che invece contribuiscono ad allontanare i sedimenti, ridistribuendoli sulla piattaforma continentale (il primo tratto del fondale marino più vicino alla costa).

Dove le correnti e l'escursione di marea (differenza di livello tra l'alta marea e la bassa marea) sono forti, i materiali trasportati dal fiume vengono trascinati al largo e la foce assume una forma a imbuto, detta **estuario**: ciò si verifica soprattutto per i fiumi che sfociano in mari aperti o in oceani. Dove l'escursione di marea o le correnti marine sono deboli, i materiali trasportati si depositano davanti alla foce, ostacolando il deflusso delle acque in mare: col tempo, i mate-

Estuario

Delta



riali sedimentati possono affiorare e formare sottili lembi di terra, che costringono il fiume a dividersi in più bracci prima di defluire in mare: questo tipo di foce prende il nome di **delta** ed è tipico dei fiumi che sfociano in mari chiusi.

### 20.3 Le acque superficiali: i laghi

I **laghi** sono masse d'acqua dolce (più raramente acque salmastre o salate) **situate in conche o in depressioni naturali della superficie terrestre**, che non comunicano direttamente con il mare; essi sono in genere in relazione con un fiume, detto **immissario**, se entra nel lago ed **emissario**, se esce dal lago. Vi sono anche laghi che hanno un immissario ma mancano di un emissario: in tal caso l'eccesso di acqua si disperde per evaporazione e perdite sotterranee; altri laghi ancora hanno l'emissario ma sono sprovvisti di un immissario e sono dunque alimentati da piogge e da sorgenti sotterranee. La scienza che studia gli ambienti lacustri e la loro evoluzione nel tempo viene detta **limnologia**.

Tra le principali **proprietà fisico-chimiche** delle acque lacustri si ricordano le seguenti:

- la **trasparenza**, minore di quella delle acque marine per una maggior quantità di materiali presenti in sospensione;
- la **temperatura**, che dipende da molti fattori, tra cui latitudine, profondità, clima locale; nelle regioni temperate e tropicali, la presenza di un lago molto grande e profondo può esercitare localmente un effetto mitigatore sul clima: ne sono un esempio i laghi prealpini (Maggiore, di Como, d'Iseo e di Garda) in Italia.
- la **salinità**: in genere inferiore a quella dei mari, è tuttavia una proprietà variabile, legata a molte cause, quali l'origine del lago, i materiali apportati dagli immissari e l'intensità dell'evaporazione.

#### ■ Classificazione dei laghi

In base all'origine della conca che li accoglie, i laghi possono essere distinti in:

- **laghi glaciali**, che occupano conche scavate dall'azione erosiva dei ghiacciai; tra essi i più diffusi sono i **laghi di circo**, che occupano il fondo di un antico circo glaciale, la parte iniziale del bacino collettore di un ghiacciaio, e i **laghi val-livi**, che occupano la parte terminale di valli formatesi per escavazione glaciale (grandi laghi prealpini italiani);
- **laghi vulcanici**, che occupano crateri o caldere di vulcani spenti; tra essi ricordiamo i laghi di Bolsena, Bracciano, Albano, Nemi e Vico, nel Lazio.

Immissario,  
emissario

Proprietà  
fisico-chimiche

Laghi glaciali

Laghi vulcanici

- **laghi carsici**, di piccole dimensioni e spesso temporanei, che si formano in una dolina (conca che si origina in una regione carsica per dissoluzione operata dall'acqua piovana sulle rocce calcaree), il cui fondo si impermeabilizza per l'accumularsi di depositi argillosi (v. par. 21.3 a p. 278); Laghi carsici
- **laghi di origine tettonica**, che occupano il fondo di una fossa tettonica o di una sinclinale (v. cap. 12); tra essi ricordiamo i grandi laghi dell'Africa orientale (Alberto, Tanganica e Niassa); Laghi tettonici
- **laghi di sbarramento**, che occupano una conca che si è formata per sbarramento di una valle in seguito all'accumulo di materiale di vario tipo: può trattarsi di morene, depositi di origine glaciale (**laghi morenici**), di cordoni sabbiosi litoranei (**laghi costieri**), di frane (**laghi di frana**) o di sbarramenti artificiali, quali le dighe, che impediscono alle acque di defluire liberamente. Laghi di sbarramento

### ■ Evoluzione di un lago

I laghi sono una formazione idrologica temporanea della superficie terrestre e sono destinati a estinguersi in tempi geologici relativamente brevi.

Si distinguono quattro fasi dell'evoluzione di un lago.

1. Il lago, da poco formato, è limpido, povero di vegetazione sulle rive, quasi privo di alghe e di animali.
2. Le acque, presso le rive, si riempiono di piante acquatiche e aumenta il numero di animali acquatici.
3. Il lago tende lentamente a colmarsi di sabbia e argilla portate dai fiumi immissari; il progressivo riempimento di un lago può avvenire anche per deposizione chimica di sali o per sedimentazione di origine eolica o vulcanica.
4. L'acqua si fa più torbida, il lago diventa sempre meno profondo e tende a divenire prima uno **stagno** (con bassa profondità e buona parte della superficie ricoperta da vegetazione), poi una **palude** (che può prosciugarsi completamente nella stagione secca), quindi una **torbiera** (con l'intera conca occupata da vegetazione inzuppata d'acqua) e infine si verifica l'interramento completo.

La scomparsa di un lago può avvenire anche per altre cause rispetto al riempimento per sedimentazione: per eccesso di evaporazione, per insufficiente apporto idrico o per erosione dello sbarramento che ne aveva causato l'origine.

Le quattro fasi evolutive

## 20.4 I ghiacciai

La maggior parte delle acque continentali si trova allo stato solido nei **ghiacciai**, enormi **distese di ghiaccio che si formano per trasformazione e compressione di accumuli di neve**. I

Che cosa sono i ghiacciai

ghiacciai occupano circa 1/11 della superficie terrestre, pari a  $15 \times 106 \text{ km}^2$ , e comprendono gli enormi ghiacciai dell'Antartide e della Groenlandia e quelli presenti sulle maggiori catene montuose. Questi sono i ghiacciai veri e propri, detti anche **ghiacciai continentali**, di cui ci occuperemo in questo paragrafo; nel riquadro a p. 269 sono descritti i ghiacci che ricoprono i mari circumpolari e formano la cosiddetta "banchisa", diversi per origine e per caratteristiche rispetto a quelli continentali.

### ■ La formazione del ghiaccio

L'acqua che precipita a quote o a latitudini elevate sotto forma di neve origina i ghiacciai nelle zone in cui, a causa della bassa temperatura, **lo scioglimento della neve in estate non è in grado di bilanciare l'apporto di neve durante l'inverno**. Il ghiaccio che costituisce i ghiacciai continentali si forma per progressiva trasformazione dei fiocchi di neve, che sono costituiti da cristalli di ghiaccio che racchiudono aria per il 90% circa in volume. Quando cadono a terra, fondono dopo una permanenza al suolo più o meno lunga. Ma, ad altitudini o a latitudini elevate, non tutta la neve si scioglie durante l'anno: la neve si accumula, il peso degli strati sovrastanti la fa continuamente fondere e la temperatura bassa la fa riconsolidare, finché tutta l'aria inizialmente presente viene eliminata e si formano masse di ghiaccio cristallizzato.

**La trasformazione della neve in ghiaccio avviene nel giro di qualche anno** e in modo discontinuo, poiché nel corso dell'anno si verificano diverse nevicate, intervallate da innalzamenti e abbassamenti della temperatura.

### ■ Morfologia e movimento di un ghiacciaio

Il **limite delle nevi persistenti** è la quota oltre la quale è maggiore la quantità di neve che cade rispetto a quella che si allontana per discioglimento: la quota a cui si trova il limite delle nevi persistenti è legata a molti fattori, quali l'esposizione, le caratteristiche del rilievo e la latitudine (essa aumenta progressivamente al diminuire della latitudine: varia dal livello del mare nelle regioni polari a 5500 metri nelle regioni tropicali).

Il limite delle nevi persistenti separa in un ghiacciaio il **bacino collettore**, detto anche circo glaciale, cioè la zona di alimentazione del ghiacciaio in cui la neve si accumula e si trasforma in ghiaccio, dal **bacino ablatore**, cioè la zona di fusione del ghiaccio, interessata dalla lenta discesa delle colate di ghiaccio, a cui si dà il nome di **lingue glaciali**; queste ultime possono spingersi molto in basso (anche 2000 m al di sotto del limite delle nevi persistenti) prima di fondere

Limite delle nevi persistenti

Bacino collettore e bacino ablatore

completamente e inoltre, durante il loro movimento, erodono le rocce su cui scorrono e trascinano con sé il materiale roccioso frantumato, che forma le **morene** (v. a p. 287). Il circo glaciale appare come una depressione scavata a forma di scodella, ha pareti scoscese su tre lati ed è aperto verso valle (**soglia del circo**). In genere, quando il ghiacciaio scompare, l'avvallamento del circo da esso abbandonato diventa un laghetto (v. a p. 264), che persiste finché il suo emisario non ne erode la soglia.

L'accumulo di neve e ghiaccio nel bacino collettore esercita una spinta che innesca la trazione per gravità verso il basso della massa glaciale.

Il ghiaccio manifesta un comportamento ora plastico ora viscoso, per cui il **movimento dei ghiacciai non è uniforme e presenta**, contemporaneamente, **caratteri di scorrimento continuo e di scivolamento in blocchi**. In corrispondenza di cambiamenti di pendenza del fondo roccioso, il ghiacciaio tende a formare profonde fratture (**crepacci**) trasversali nella parte superficiale, dovute alla tensione prodotta dal moto differenziale e dall'attrito, mentre ai lati, dove le pareti rallentano lo scorrimento della massa glaciale, i crepacci tendono a essere longitudinali. Là dove il substrato si curva repentinamente in un rapido gradino, la massa glaciale, per l'aumentata pendenza, accelera il suo movimento. Si originano numerose fratture trasversali e longitudinali, che si intersecano e isolano giganteschi blocchi irregolari e alti anche parecchi metri, detti **seracchi**.

Secondo le più recenti interpretazioni, il movimento dei ghiacciai (la cui velocità varia da frazioni di metro al giorno per i ghiacciai alpini fino a 20 m al giorno per quelli groenlandesi) sarebbe dovuto sia a un "**colamento plastico**", regolato dallo spessore della massa interessata, sia a un "**colamento per scivolamento**", indotto dalla presenza di tasche d'acqua dovute alla fusione del ghiaccio sul fondo per effetto di elevate pressioni e per il flusso di calore proveniente dall'interno della Terra.

Le acque di fusione del ghiaccio tendono a confluire in profondità, formando un vero e proprio torrente subglaciale che sfocia all'esterno attraverso una **bocca**, più o meno ampia, posta nella parte terminale del ghiacciaio, detta **fronte del ghiacciaio** (fig. 20.3).

### ■ La classificazione morfologica dei ghiacciai

Il modello di ghiacciaio prima descritto corrisponde al ghiacciaio di tipo alpino; tuttavia, dal punto di vista morfogenetico, si possono distinguere diversi tipi di ghiacciaio, riuniti

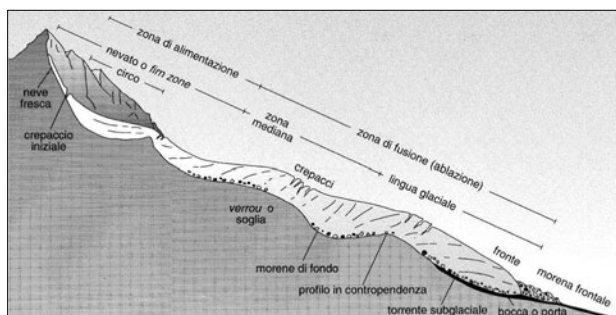
Morene e soglia di circo

Crepacci

Seracchi

Colamento plastico e per scivolamento

Fronte del ghiacciaio

**Figura 20.3**Sezione longitudinale  
di un ghiacciaio alpino.

in **ghiacciai continentali**, o *inlandsis*, che costituiscono la quasi totalità delle aree occupate dai ghiacciai, e **ghiacciai montani**, che comprendono ghiacciai di tipo alpino, himalayano, alascano, scandinavo e pirenaico. Le caratteristiche e la localizzazione di ciascuno di questi tipi sono riassunte in tab. 20.1.

### ■ Bilancio glaciale

Il ghiacciaio è un corpo dinamico, che nel tempo varia di dimensioni. Di tali cambiamenti è possibile effettuare un bilancio riportando le entrate, o **alimentazione** (l'accumu-

**Tabella 20.1** Tipi di ghiacciaio

TIPO	LOCALIZZAZIONE	CARATTERISTICHE PARTICOLARI
<b>polare o inlandsis</b>	Antartide, Groenlandia	ghiacciai grandiosi, che ricoprono estese superfici di terre emerse con uno spessore che supera i 4000 m, con fronti che si immergono nel mare (con 50-60 m di spessore per la parte emersa e oltre 300 m per la parte sommersa)
<b>alpino</b>	Alpi (soprattutto)	ghiacciai nei quali è bene evidente la distinzione fra il bacino collettore (esteso ed elevato) e il bacino ablatore, al disotto del limite delle nevi persistenti
<b>himalaiano</b>	Himalaia, Karakoram, Pamir, Tibet	ghiacciai con le stesse caratteristiche di quelli alpini, ma più imponenti e derivanti da più bacini collettori, che confluiscono in un'unica grande lingua glaciale
<b>alascano</b>	Alaska (in particolare)	ghiacciai costituiti da diverse "lingue" che percorrono valli glaciali parallele, che a un certo punto si riuniscono per formare, ai piedi del monte, un'unica fascia di ghiaccio di enormi dimensioni
<b>scandinavo</b>	Islanda, Alpi Norvegesi, Montagne Rocciose	ghiacciai formati da un unico grande bacino collettore, da cui scendono numerose "lingue" che divergono a raggiera (in parte)
<b>pirenaico</b>	Pirenei (in particolare)	ghiacciai di modeste dimensioni, localizzati al di sopra del limite delle nevi persistenti, fatti quasi esclusivamente dal bacino collettore; mancano di una vera e propria lingua glaciale

## I GHIACCIAI CIRCUMPOLARI

A differenza dei ghiacciai continentali, quelli circumpolari si formano per solidificazione delle acque di mare: essi ricoprono più o meno permanentemente la superficie dei mari circumpolari formando la banchisa, detta anche pack, lastrone di ghiaccio dello spessore di 2-3 m la cui estensione varia seguendo le variazioni stagionali della temperatura: la maggiore estensione si ha durante la lunga notte polare, periodo in cui, nelle zone polari, il Sole si mantiene sotto l'orizzonte.

Dato il suo contenuto in sali (tra 32 e 34‰), perché l'acqua dei mari circumpolari cominci a solidificare, la temperatura deve scendere al di sotto di 0 °C, solitamente sotto -2 °C: il ghiaccio così formatosi, per la sua minore densità rispetto all'acqua, galleggia su di essa. Il ghiaccio è

costituito da acqua pura; i sali rimangono invece disciolti nell'acqua circostante, aumentandone la salinità e la densità: perché si formi altro ghiaccio è dunque necessario un ulteriore abbassamento della temperatura. Non esiste quindi un preciso punto di solidificazione dell'acqua di mare, ma esso varia al variare della salinità.

Durante il disgelo, la banchisa può frantumarsi in porzioni che possono allontanarsi dalla banchisa stessa e sciogliersi rapidamente, perché di spessore limitato.

Nelle zone circumpolari adiacenti alle aree continentali, è possibile che le lingue glaciali dei ghiacciai continentali raggiungano il mare e si frantumino formando gli iceberg, masse di ghiaccio galleggianti di notevole spessore, maggiore rispetto alla banchisa.

lo di neve), e le uscite, o **ablazione** (la fusione del ghiaccio). Se l'alimentazione supera l'ablazione il ghiacciaio si espande; se è invece l'ablazione a prevalere, il ghiacciaio si riduce di dimensioni e di volume. Dato che la massa di ghiaccio ha una notevole inerzia, che cresce con l'aumentare della massa, perché le modificazioni risultino visibili occorre che per parecchi anni la tendenza sia costante.

Per registrare anche le piccole variazioni, occorre procedere al **bilancio di massa**, effettuato anno per anno mediante misurazioni dirette sul corpo glaciale. Le principali misure riguardano:

- lo spessore della neve annuale;
- la densità della neve;
- l'abbassamento della superficie dopo la fusione estiva.

Mettendo in relazione tutte queste misurazioni, è possibile stabilire in quali aree nell'anno è prevalsa l'ablazione e dove invece è l'alimentazione a dominare (la misurazione del bilancio di massa è un'operazione complessa e lunga, che richiede molto tempo e mezzi cospicui).

Un **altro tipo di bilancio**, più parziale e approssimativo, che tuttavia ha un notevole significato statistico, è quello effettuato tramite la misurazione della **variazione delle lingue glaciali**. In Italia ogni anno sono tenuti sotto controllo circa 200 ghiacciai durante la Campagna Glaciologica organizzata dal Comitato Glaciologico Italiano.

Rapporto  
alimentazione-  
ablazione

Bilancio di massa

Variazione  
delle lingue glaciali

## 20.5 Le acque sotterranee: le falde e le sorgenti

Le acque che giungono sulla superficie terrestre con le precipitazioni possono infiltrarsi nel sottosuolo e costituire le **acque sotterranee**; esse possono poi ritornare in superficie, o per mezzo di pozzi scavati dall'uomo o spontaneamente attraverso le sorgenti.

La velocità di percolazione e la quantità di acqua che si può accumulare nel sottosuolo dipendono dal grado di **permeabilità** delle rocce che lo formano, cioè dalla capacità di lasciarsi attraversare dalle acque, che a sua volta dipende dalla **porosità** delle rocce, dovuta alla presenza di interstizi tra i granuli costituenti la roccia. Rocce incoerenti, come le ghiaie e le sabbie, e rocce fessurate, quali calcari e dolomie fessurate, sono tra le più permeabili. I depositi sciolti più fini e le rocce compatte non fessurate (per esempio, i calcari compatti e in generale le rocce metamorfiche e quelle ignee) sono invece impermeabili.

Dello studio delle acque che scorrono sottoterra si occupa l'**idrogeologia**.

### ■ Le falde freatiche e le falde artesiane

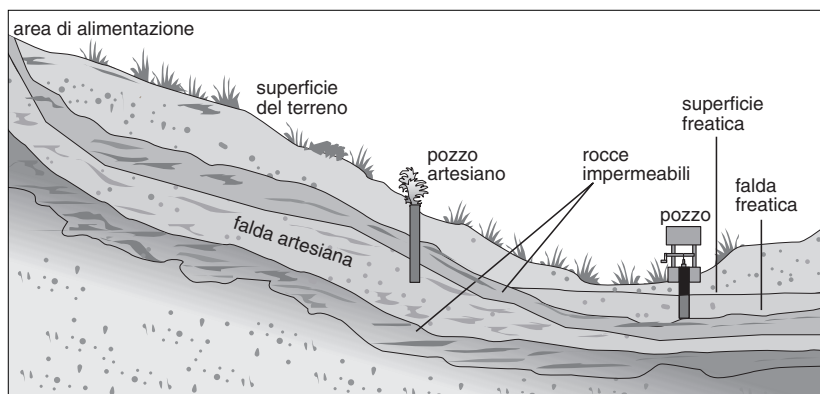
Pentrate nel suolo per effetto della forza di gravità, le acque occupano pian piano tutte le cavità del terreno, riempiendo i microscopici spazi presenti tra granulo e granulo di rocce, che per questo motivo sono dette **rocce-serbatoio** o **rocce acquifere**: esse impregnano il sottosuolo finché non raggiungono uno strato di rocce impermeabili che ne ostacola l'ulteriore discesa e, accumulandosi negli interstizi, formano una **falda acquifera**, detta anche **falda freatica**. La superficie superiore della falda è detta **superficie freatica**: essa subisce delle oscillazioni stagionali, legate alla distribuzione delle precipitazioni nel corso dell'anno. Quando l'acqua che si infila supera la quantità di acqua rimossa dalle radici delle piante e dall'evaporazione, il livello della superficie freatica di solito sale, riempiendo tutti i pori delle rocce. Nei periodi secchi, la superficie freatica si abbassa e si riduce lo spessore della falda freatica. La zona al di sopra della falda freatica, cioè quella in cui il suolo e i sedimenti non sono saturi di acqua, ma occupati da aria, viene detta **zona di aerazione**.

Se la falda è compresa fra due strati impermeabili si ha una **falda artesiaiana**, confinata entro uno spazio limitato e nella quale l'acqua si trova in pressione. Mentre per le falde freatiche l'alimentazione proviene, praticamente, dall'intera superficie topografica che le sovrasta, a condizione che il ter-

Rocce-serbatoio

Falda freatica

Falda artesiaiana

**Figura 20.4**

*La falda freatica, la falda artesianiana e tipologie di pozzi.*

reno sia permeabile, per quelle artesiane le aree di alimentazione sono poste ai margini degli strati impermeabili sedimentari. Il sottosuolo non ospita in genere una sola falda, ma contiene più falde sovrapposte. Se si scava un pozzo che raggiunge una falda freatica, l'acqua rimane a livello della superficie della falda stessa e non emerge spontaneamente. Se invece il pozzo raggiunge una falda artesianiana, dato che l'acqua è compressa fra due strati impermeabili, essa zampilla da sola in superficie e si parla di **pozzo artesiano** (fig. 20.4).

## ■ Le sorgenti

Il punto del terreno in cui la superficie libera di una falda viene a contatto con la superficie del terreno e l'acqua sotterranea sgorga spontaneamente in superficie si chiama **sorgente**.

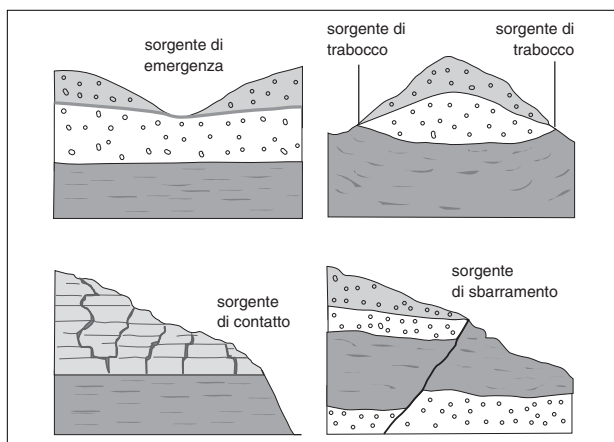
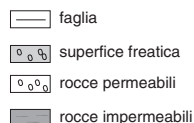
A seconda delle modalità di affioramento, le sorgenti vengono classificate in:

- **sorgenti di emergenza**, che si originano quando la falda freatica taglia la superficie del suolo; possono scomparire col tempo, in rapporto alle variazioni che subisce il livello dell'acqua nella falda; Sorgenti di emergenza
- **sorgenti di trabocco**, che si originano quando l'acquifero raccoglie più acqua di quanta possa contenerne; di trabocco
- **sorgenti di contatto**, che si originano per contatto dell'acquifero, formato da rocce permeabili, con uno strato impermeabile sottostante che affiora, causando la fuoriuscita delle acque accumulate nello strato sovrastante; di contatto
- **sorgenti di sbarramento**, che si originano quando un ostacolo (per esempio, una faglia) interrompe la falda acquifera che è così costretta ad affiorare (fig. 20.5). di sbarramento



**Figura 20.5**

*Tipi di sorgente.*



Le acque di falda e le sorgenti sono generalmente acque di buona qualità e per questo motivo, captate tramite pozzi in falda o con bottini di presa alle sorgenti, sono destinate al consumo umano.

## GLOSSARIO

### **Ablazione**

Processo di riduzione della superficie dei ghiacciai a causa soprattutto dell'aumento di temperatura, che provoca la fusione del ghiaccio.

### **Affluente**

Corso d'acqua che si getta in un altro maggiore. Si definisce di destra o di sinistra a seconda della sua provenienza rispetto al senso di scorrimento del fiume.

### **Alveo**

Solco morfologico nel quale scorre l'acqua di un corpo idrico superficiale.

### **Artisiana, falda**

Falda idrica in cui l'acqua si trova in pressione, essendo racchiusa tra due orizzonti impermeabili.

### **Bacino idrografico**

Tutta l'area di cui un dato corso d'acqua raccoglie le acque.

### **Circo glaciale**

Piccola conca, a forma di "poltrona a braccioli", ubicata in alta montagna, dov'è o era insediato il ghiacciaio che lo ha modellato.

**Delta**

Foce di un fiume a forma di ventaglio, solcato da vari rami terminali del corso d'acqua, che si forma quando l'entità della sedimentazione di materiali trasportati dal fiume supera nettamente l'erosione operata dal moto ondoso, dalle correnti marine e dalle maree.

### **Emissario**

Corso d'acqua che esce da un lago o che prende origine da esso.

### **Estuario**

Foce di un fiume a forma di imbuto che si origina quando i materiali trasportati dal corso d'acqua vengono rimossi e ridistribuiti sulla piattaforma continentale dalle correnti marine e dalle maree.

### **Freatica, falda**

Falda idrica sotterranea compresa fra uno strato permeabile superiore e uno strato impermeabile inferiore.

## segue

impermeabile inferiore.

**Foce**

Punto in cui un corso d'acqua s'immette nel mare, in un lago o in un altro corso d'acqua.

**Fronte glaciale**

Estremità più avanzata di una lingua glaciale.

**Immissario**

Corso d'acqua che sfocia in un lago.

**Meandro**

Successione a forma di "S" di due curve descritte da un corso d'acqua.

**Pozzo**

Scavo praticato nel terreno per raggiungere una falda acquifera.

## TEST DI VERIFICA

**1 Quale dei seguenti elementi non fa parte di un ghiacciaio?**

- a** bacino collettore;
- b** bacino idrografico;
- c** bacino ablatore;
- d** lingua.

**2 Gli strati che contengono una falda freatica sono:**

- a** superiore permeabile-inferiore permeabile;
- b** superiore permeabile-inferiore impermeabile;
- c** superiore impermeabile-inferiore permeabile;
- d** superiore impermeabile-inferiore impermeabile.

**3 Una sorgente si può formare:**

- a** alla base della falda freatica;
- b** al contatto fra strati permeabili e impermeabili;
- c** all'intersezione di una falda freatica con la superficie terrestre;
- d** nessuna delle precedenti.

**4 In un fiume la velocità dell'acqua:**

- a** varia casualmente;
- b** aumenta dalla superficie verso il fondo;
- c** diminuisce dalla superficie verso il fondo;
- d** è massima al centro della sezione.

**5 Un corso d'acqua che entra in un lago si chiama:**

- a** affluente;
- b** confluenza;
- c** immissario;
- d** emissario;
- e** ruscello.

**R**

1 b; 2 b; 3 c; 4 d; 5 c.

# 21 Il modellamento della superficie terrestre

---

La superficie terrestre presenta una **grande varietà di paesaggi**, che sono il **risultato dell'azione continua e incessante degli agenti geomorfologici**. Tra essi distinguiamo agenti geomorfologici **endogeni e agenti esogeni**, che agiscono smantellando i rilievi, attraverso l'erosione delle rocce: l'**atmosfera**, che opera una degradazione meteorica delle rocce, attraverso la disgregazione fisica e l'alterazione chimica; le **acque piovane** che, agendo sulle rocce calcaree, determinano il fenomeno del carsismo; il **vento**, che agisce soprattutto in zone a clima arido e prive di copertura vegetale; i **fiumi**, che scavano valli con profilo a "V" e costruiscono pianure alluvionali; i **ghiacciai**, che con il loro impercettibile ma continuo movimento scavano valli dal profilo a "U" e depositano morene; infine i **mari**, che agiscono incessantemente sulle coste.

## 21.1 Gli agenti geomorfologici

Sulla superficie terrestre si può osservare una notevole varietà di paesaggi e, col passare del tempo, uno stesso paesaggio può subire modificazioni: tutto ciò è il risultato dell'azione degli **agenti geomorfologici** (dal greco *geo*, terra e *morphé*, forma), capaci di modellare la superficie terrestre variandone continuamente e incessantemente l'aspetto.

Tra gli agenti geomorfologici, alcuni tendono a costruire nuova crosta terrestre, a sollevare le rocce della crosta terrestre e formare così dei rilievi, altri, invece, agiscono livellando e spianando i rilievi attraverso l'erosione delle rocce. Tra i primi sono compresi i fenomeni orogenetici, sismici e vulcanici, che costituiscono agenti geomorfologici **endogeni**, poiché si originano all'interno della Terra: escludendo l'orogenesi, che richiede tempi lunghi, essi agiscono in modo discontinuo e in tempi brevi (di essi si è trattato nei capitoli 12, 14 e 15).

Il secondo gruppo, **agenti esogeni**, comprende invece l'atmosfera e i fenomeni che in essa si verificano (per esempio, i venti e le precipitazioni), i fiumi, i ghiacciai e i mari. Sono detti agenti geomorfologici esogeni, poiché si originano all'esterno della Terra; essi agiscono in modo continuo e il risultato della loro azione è visibile in tempi lunghi.

Gli agenti geomorfologici esogeni, di cui ci occupiamo di se-

Agenti endogeni

Agenti esogeni

guito, agiscono attraverso tre momenti comuni: l'**erosione** delle rocce, il **trasporto** dei materiali provenienti dall'erosione e il loro **deposito**.

Inoltre, l'intensità dell'erosione operata dagli agenti esogeni non è la stessa su tutta la superficie terrestre: oltre che dalla durata dell'azione degli agenti esogeni, l'erosione dipende anche dalle condizioni climatiche, dall'altimetria, dalle caratteristiche litologiche della zona e dalla copertura vegetale. Infatti, dal clima dipendono la piovosità e la temperatura, l'azione erosiva delle acque è maggiore su territori a forte pendenza, alcuni tipi di rocce sono più facilmente erodibili di altre e la presenza della vegetazione riduce e rallenta l'erosione.

Erosione

## 21.2 L'azione geomorfologica dell'atmosfera

L'atmosfera e i fenomeni che in essa avvengono sono importanti agenti di modellamento della superficie terrestre: essi agiscono sulle rocce affioranti attraverso un insieme di processi che vengono complessivamente indicati come **degradazione meteorica**, che comprende processi di disgregazione fisica (prevalenti in ambienti aridi) e di alterazione chimica (prevalenti in ambienti umidi).

Degradazione meteorica

### ■ Processi di disgregazione fisica

Sono **prevalentemente di tipo meccanico**, o **elastico** (dal greco *klázo*, rompo), e comportano la rottura di una roccia in frammenti via via più piccoli. I più importanti sono il crioclastismo, il termoclastismo, l'idroclastismo e la rottura per decompressione.

Il **crioclastismo** è il processo di rottura di una roccia dovuto all'aumento di volume dell'acqua quando questa ghiaccia solidificandosi. Interessa in particolare le rocce porose e quelle fratturate, che offrono spazi vuoti che possono essere colmati dall'acqua. Negli ambienti caratterizzati da numerosi **cicli di gelo-disgelo** (dove la temperatura passa con frequenza da valori inferiori a 0 °C a valori superiori) l'acqua, solidificando, aumenta di volume ed esercita sulle pareti della roccia una pressione che tende ad allargare le fessure. Con il ripetersi del fenomeno, le fratture diventano sempre più profonde, finché la roccia si frantuma in blocchi disarticolati l'uno dall'altro. I frammenti, detti **crioclasti**, di norma a spigoli vivi, hanno dimensioni variabili, che dipendono dalle condizioni originarie della roccia, dal numero delle fratture, dal volume dei pori ecc.

Crioclastismo

Il **termoclastismo** è un fenomeno **caratteristico delle zone**

Termoclastismo

climatiche **con forti e frequenti escursioni termiche giornaliere** ed è dovuto alla bassa capacità termica delle rocce. Gli ambienti in cui il fenomeno è più evidente sono i deserti caldi e le zone alpine al di sopra del limite del pascolo, data l'assenza di coltre vegetale capace di mitigare gli effetti dell'irradiazione solare diretta sulle rocce. Il riscaldamento delle rocce durante le ore di luce e il loro raffreddamento di notte provocano, alternativamente, la dilatazione e la contrazione delle rocce affioranti, che a seguito del ripetersi del fenomeno tendono a disgregarsi. Più in dettaglio, i differenti coefficienti di dilatazione di ciascun minerale, il differente assorbimento di calore (che varia in ragione delle tonalità di colore) dei singoli cristalli, la loro attitudine a riflettere o ad assorbire la radiazione luminosa provocano micromovimenti differenziali che a poco a poco ne inducono la separazione. Il fenomeno **interessa soprattutto gli strati superficiali delle rocce**, provocandone la desquamazione, la fratturazione, l'esfoliazione e la disgregazione; i frammenti di roccia derivanti da questo processo prendono il nome di **termoclasti**.

Idroclastismo

L'**idroclastismo** è un fenomeno legato alla proprietà di alcune rocce di assumere con facilità acqua in ambiente umido e di perderla per evaporazione in ambiente secco (igroscopia). Nel primo caso si dilatano, nel secondo si contraggono: la variazione volumetrica le rende soggette a particolari forme di disfacimento. Il fenomeno è tipico delle argille, che quando piove si "gonfiano", mentre quando il clima è arido si fessurano profondamente e si desquamano in superficie; il reticolo di fessure profonde e la copertura di squame rendono disaggregata la roccia, esponendola più facilmente a ulteriori processi d'erosione e di degrado.

Rottura per decompressione

La **rottura per decompressione** è provocata dalla mobilitazione della porzione più superficiale di un versante (per frana, per erosione o anche per opera dell'uomo), che determina l'affioramento della roccia sottostante. Per effetto della decompressione, la roccia può andare soggetta a fenomeni di dilatazione, che possono portare a fratturazione lungo preesistenti giunti di discontinuità o di stratificazione o di scistosità oppure lungo **litoclasti** (fratture dovute a movimenti della crosta terrestre).

### ■ Processi di alterazione chimica

L'acqua e i gas dell'aria sono in grado di reagire chimicamente con i minerali delle rocce, dando luogo a complessi processi di alterazione chimica e creando vari tipi di prodotti d'alterazione.

I più importanti processi di alterazione chimica sono l'ossidazione, l'idratazione, la carbonatazione e l'idrolisi.

L'**ossidazione** è un processo per cui molti minerali cristallizzati in un ambiente riducente a contatto con l'ossigeno atmosferico si ossidano e generano ossidi e idrossidi. Il processo è molto vistoso nei minerali del ferro: per esempio, la pirite di solfuro di ferro ( $\text{FeS}_2$ ) si trasforma in solfato ( $\text{FeSO}_4$ ); altri minerali danno origine a ossidi, quali l'ematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e la magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Tali processi sono resi evidenti dalla colorazione che assume il materiale alterato: infatti, gli ossidi di ferro hanno toni cromatici rossi in diverse sfumature. In seguito all'ossidazione, le superfici esposte delle rocce si coprono sovente di una patina di colore diverso rispetto alla roccia inalterata: sono particolarmente vistose quelle tipiche delle regioni aride, che prendono il nome di "vernice del deserto". Altre coltri, dall'aspetto di crosta o di spalmatura, sempre intensamente colorate, si generano lungo le litoclasti che percorrono la massa rocciosa; in questo caso sono dovute, oltre all'azione dell'ossigeno, anche a quella dell'acqua che percola lungo il piano di frattura.

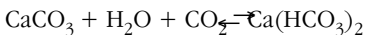
Ossidazione

L'**idratazione** è un processo dovuto al fatto che alcuni minerali, a contatto con l'umidità dell'aria o con l'acqua che scorre in superficie, possono fissare molecole d'acqua, che comportano il cambiamento della configurazione cristallina dei minerali: per esempio, per idratazione, l'anidrite, solfato di calcio anidro,  $\text{CaSO}_4$ , si trasforma in gesso, solfato di calcio biidrato  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . L'assunzione di molecole d'acqua comporta anche un aumento di volume dei corpi rocciosi. La deformazione che ne consegue può dare l'avvio ad altri processi di tipo dinamico, come crolli o frane.

Idratazione

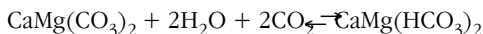
La **carbonatazione** è un processo che interessa il carbonato di calcio, sale che forma la calcite, il minerale dominante del calcare (una roccia estremamente diffusa sulla superficie terrestre). Il carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) è insolubile in acqua pura, ma diventa solubile se l'acqua contiene una quantità anche piccola di anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ). L'acqua piovana, che contiene disciolta l'anidride carbonica, è in grado di reagire con il carbonato di calcio e di produrre bicarbonato acido di calcio,  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , secondo la reazione di equilibrio (indicata dalla doppia freccia):

Carbonatazione



Il bicarbonato di calcio è solubile e può essere asportato dalle acque circolanti. In tal modo si originano quei processi di corrosione chimica che sono alla base del fenomeno del **carsismo** (v. par. 21.3).

Reazioni analoghe a quelle descritte interessano altre rocce, come la dolomia, formata di dolomite, un carbonato doppio di calcio e magnesio:



Anche in questo caso il carbonato, insolubile, si trasforma in un bicarbonato, solubile.

Idrolisi

L'**idrolisi** è una complessa reazione chimica fra l'acqua e i silicati ed è assai diffusa, data l'estrema abbondanza di rocce contenenti minerali silicati. L'azione dell'acqua è determinata dalla sua capacità di dissociarsi in ioni idrogeno positivi ( $\text{H}^+$ ) e ioni ossidrilici negativi ( $\text{OH}^-$ ). Tali ioni aggrediscono i silicati presenti nelle rocce e ne liberano gli ioni metallici: questi, legandosi agli ioni ossidrilici, formano delle basi che passano in soluzione, mentre i silicati si trasformano in silicati idrati. Non tutti i minerali silicati subiscono il processo di idrolisi allo stesso modo. Alcuni, come i feldspati e la biotite, sono più alterabili; altri, come la muscovite e soprattutto il quarzo, lo sono molto meno. Rocce policristalline, come il granito, in ambiente caldo-umido vanno, dunque, soggette a processi di alterazione differenziale. I processi di idrolisi si verificano in quasi tutti gli ambienti, ma con velocità che tende ad aumentare con l'aumentare della temperatura e dell'umidità (l'idrolisi dei silicati è particolarmente intensa nelle zone equatoriali e tropicali, caratterizzate da condizioni di umidità e temperatura elevate).

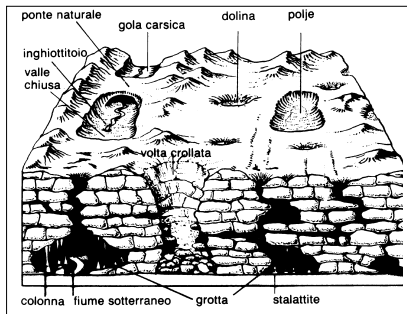
## 21.3 Il carsismo

Il carsismo è un fenomeno erosivo, conseguenza del processo di carbonatazione, in cui l'acqua piovana, che contiene disciolta l'anidride carbonica, altera chimicamente i rilievi calcarei e ne erode numerose porzioni, fino a creare un paesaggio ricco di forme particolari. La reazione di carbonatazione è accelerata dal calore e, di conseguenza, i climi più favorevoli al processo carsico sono quelli tropicali e temperati.

L'**acqua che si infiltra** nel massiccio carsico esercita la sua azione mediante **processi** sia di **corrosione chimica**, sia di **erosione meccanica**. Perché il processo progredisca nello spazio e nel tempo, occorre che la roccia sia fratturata, in modo che le acque meteoriche penetrino in profondità. Queste acque meteoriche, una volta penetrate, circolano nel sottosuolo seguendo le fessure delle rocce, che contribuiscono ad allargare, e possono riaffiorare attraverso le sorgenti (v. la loro classificazione a p. 271).

**Figura 21.1**

Le principali strutture morfologiche epigee e ipogee di origine carsica.



Il nome del processo deriva dalla zona del Carso, in Friuli Venezia Giulia, dove è particolarmente evidente (in Italia paesaggi carsici sono molto diffusi anche nell'Appennino centrale e in Puglia).

Il carsismo è chiamato **epigeo** quando interessa le rocce solubili affioranti in superficie e **ipogeo** quando agisce in profondità: nei due casi hanno origine numerose formazioni caratteristiche, alcune delle quali particolarmente spettacolari (fig. 21.1).

Carsismo epigeo e ipogeo

## ■ Il carsismo epigeo

Le formazioni tipiche più significative sono le doline, le uvala e i polje.

Una **dolina** è una conca chiusa, depressa rispetto al piano di campagna, talvolta provvista di un **inghiottitoio**, che raccoglie le acque meteoriche e le convoglia in cavità sotterranee. Le pareti e il fondo di una dolina possono essere fratturati e permeabili all'acqua; se le fessure sono riempite del residuo insolubile del processo di carbonatazione, detto **terra rossa** (costituita da argille e piccole quantità di ossidi di ferro), il drenaggio può essere totalmente o parzialmente impedito. Nel primo caso, sul fondo della dolina occhieggia un laghetto; nel secondo caso ristagna una palude, limitata ai periodi di maggiore precipitazione. Le dimensioni di una dolina variano in modo anche considerevole (il diametro della conca può essere di pochi metri, ma anche di oltre 1 km; la profondità oscilla tra 1-2 m e 200 m.)

Doline

Il profilo di una dolina può essere ellittico, subcircolare, lobato o irregolare, in particolare quando deriva dalla fusione di doline più piccole che, ingrandendosi per solubilizzazione progressiva delle pareti che le separavano, vengono a contatto con i loro contorni fino a unirsi insieme.

Le **uvala** sono depressioni molto grandi, dal contorno loba-

Uvala



to e del diametro sovente superiore ai 1000 m. Derivano dalla fusione di doline contigue, ciascuna in allargamento per corrosione progressiva delle pareti.

Polje, o foibe

I **polje**, detti anche **foibe**, sono depressioni chiuse, di dimensioni enormi (anche decine di km<sup>2</sup>) con un fondo pianeggiante, a pendenza debolissima, raccordato con un angolo brusco a pareti erette.

Campi solcati

Tra le forme del carsismo epigeo ricordiamo infine i **campi solcati**, detti anche campi carreggiati; sono zone calcaree che presentano numerosi solchi, più o meno paralleli e con profondità variabile da pochi centimetri a qualche metro, separati da creste ora arrotondate ora aguzze e taglienti; si originano per scorrimento e dissoluzione operata dalle acque meteoriche sulla superficie di rocce calcaree.

### ■ Il carsismo ipogeo

Speleologia

Il carsismo ipogeo è oggetto di studio di una vera e propria scienza, la **speleologia** (dal latino *spelaeum*, caverna).

L'azione dell'acqua contenente disciolta anidride carbonica nelle cavità ipogee varia nel tempo. Dapprima si manifesta appena al di sotto della superficie; con il passare del tempo si attivano, per corrosione, nuove vie di flusso delle acque, più profonde, che permettono il verificarsi dei processi di solubilizzazione a livelli via via inferiori.

Pozzi e grotte

La circolazione delle acque all'interno delle rocce calcaree crea l'insieme delle forme ipogee, che sono principalmente pozzi e grotte:

- **pozzi fusiformi**, o fusi, cavità allungate in senso verticale, assottigliate alle due estremità, si creano in corrispondenza agli spazi più ricchi di fratture;

- **grotte**, formatesi per progressiva compenetrazione dei singoli pozzi fusiformi in espansione. La varietà delle forme, le diverse strutture che si formano in ragione dei processi corrosivo-deposizionali (a loro volta condizionati dal clima, dalla litologia, dalla tettonica, dalla geomorfologia) fanno delle grotte carsiche un ambiente molto caratteristico;

- **gallerie**, lunghe condotte orizzontali;

- **abissi**, pozzi a sviluppo verticale.

All'interno delle grotte, l'anidride carbonica disciolta nelle acque può liberarsi (per esempio, perché aumenta la superficie evaporante dell'acqua, che esce dalle fessure in gocce, e nello stesso tempo diminuisce la pressione): perciò, il bicarbonato disciolto nelle acque si trasforma in carbonato di calcio, che precipita in una forma amorfa, detta alabastro, e origina così le stalattiti, le stalagmiti e le colonne.

Stalattiti

Le **stalattiti** sono esili forme coniche o cilindriche, che pen-

dono dalla volta della grotta, di lunghezza variabile da pochi centimetri a diversi metri; le stalattiti, per accrezione progressiva, aumentano di lunghezza e di diametro.

Le **stalagmiti** sono forme mammellonari, a cupole sovrapposte, che si sviluppano sul pavimento della grotta là dove cade la goccia che si stacca dal soffitto. In questo caso è l'urto a terra a provocare la precipitazione del carbonato di calcio. Stalagmiti

Le **colonne** si formano per prolungamento verso il basso delle stalattiti e crescita verso l'alto delle stalagmiti; hanno diametro variabile e sono rastremate al centro. Colonne

## 21.4 L'azione geomorfologica del vento

Il vento modella la superficie terrestre soprattutto in zone in cui la copertura vegetale è ridotta o assente, particolarmente nei deserti, ma anche in altre zone a clima arido o semiarido e sulle cime più alte delle catene montuose. L'azione di modellamento eolico (da Eolo, dio dei venti nella mitologia greca) è invece minima là dove la superficie terrestre è coperta da un rivestimento vegetale continuo, che la protegge sia dalla disgregazione fisica, sia dall'alterazione chimica.

L'azione erosiva del vento dipende dall'energia che, per attrito, esso trasferisce alla superficie delle rocce, la quale è a sua volta proporzionale alla velocità del vento.

### ■ Le forme di erosione

Il modellamento eolico si esercita attraverso la deflazione e la corrasione.

La **deflazione** consiste nel sollevamento e nell'asportazione dei singoli frammenti prodotti dalla disgregazione fisica delle rocce: in questo modo le rocce vengono continuamente messe a nudo subendo la degradazione meteorica, soprattutto per termoclastismo. Deflazione

Questo incessante denudamento produce formazioni che prendono il nome di **deserto roccioso**, o **hamada** (così chiamati nel Sahara), enormi distese di rocce da cui il vento asporta continuamente i materiali prodotti dalla disgregazione fisica. Se, invece, la zona desertica è costituita da materiale roccioso incoerente, la deflazione rimuove solo i materiali più fini lasciando in luogo ciottoli e ghiaie: si originano allora **deserti ciottolosi**, o **serir** (così chiamati nel Sahara). Deserto roccioso e deserto ciottoloso

Dopo aver sollevato le singole particelle, il vento le trasporta con modalità e per distanze diverse a seconda delle loro dimensioni: a parità di energia del vento, i materiali più fi-

ni, quali le polveri, i limi e le argille, vengono trasportati in sospensione per lunghe distanze, anche centinaia di chilometri, prima di depositarsi (v. riquadro a fronte). I granuli di sabbia vengono trasportati per saltazione per tragitti più brevi, cioè il vento fa compiere loro un salto tanto più lungo quanto minori sono le loro dimensioni. I materiali più grossolani, quali ciottoli o grossi granuli sabbiosi, vengono invece trasportati per rotolamento sulla superficie terrestre e si accumulano in depressioni preesistenti.

**Tempeste di polvere** Nelle zone aride, dove la copertura vegetale è molto ridotta, il vento è in grado di sollevare grandi masse di materiale fine, dando origine alle **tempeste di polvere**. La polvere trasportata dal vento non deriva solo dalla disaggregazione delle rocce, ma può essere anche di origine vulcanica: durante le eruzioni vulcaniche vengono eiettate nell'alta atmosfera enormi quantità di ceneri, che sono prese in sospensione dalle correnti stratosferiche e possono compiere fino a migliaia di chilometri prima di sedimentare al suolo o sulla superficie oceanica. La dispersione in atmosfera di queste ceneri può provocare importanti modificazioni climatiche.

**Corrasione** La **corrasione** è l'**azione abrasiva** esercitata direttamente dal vento attraverso i granuli che esso trasporta e che colpiscono le superfici esposte di roccia nuda, modellandola. È particolarmente attiva quando granuli duri, per esempio di quarzo, agiscono su rocce tenere, quali arenarie a cemento calcareo. Le rocce vengono così variamente smerigliate e lisce e possono assumere forme insolite e curiose, che dipendono, oltre che dal diverso grado di compattezza della roccia, anche dalla velocità del vento e dalla sua direzione.

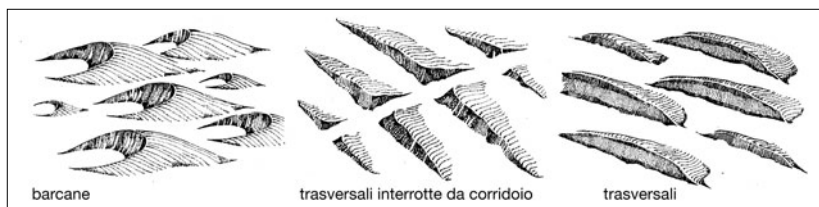
### ■ Le forme di deposito

**Dune** Le forme più tipiche di deposito eolico sono le **dune**, rilievi di materiale sabbioso costruiti dal vento. Esse hanno generalmente un profilo asimmetrico, con il versante sopravento (cioè esposto al vento) a pendenza dolce e quello sottovento più erto (fig. 21.2).

In base alla loro evoluzione, si possono distinguere le dune attive, o viventi, e le dune fisse, o inattive.

**Dune attive** Le **dune attive**, o **viventi**, sono continuamente in via di modellamento, perché prive di una copertura vegetale in grado di proteggerle dalla deflazione eolica. Esse si spostano secondo la direzione del vento: il movimento coinvolge le singole particelle di sabbia, che rotolano lungo il lato sopravento e precipitano oltre la cresta, inducendo nel loro insieme il movimento dell'intero rilievo.

**Dune fisse** Le **dune fisse**, o **inattive**, sono invece ricoperte da una coltre

**Figura 21.2**

*Le dune di sabbia sono asimmetriche: il lato sopravvento ha una pendenza minore di quello sottovento.*

vegetale che contribuisce a stabilizzarle. Esse si sono originate, infatti, come dune mobili, sovente in periodi caratterizzati da clima più arido; successivamente l'aumento delle precipitazioni, favorendo la nascita della vegetazione, ne ha cambiato l'assetto dinamico. La stabilizzazione della duna può anche essere dovuta all'azione dell'uomo, interessato a recuperare all'uso il rilievo, oppure a impedire che il cumulo di sabbia in movimento seppellisca terreni coltivati o manufatti.

## 21.5 L'azione geomorfologica dei fiumi

I fiumi sono importanti agenti di modellamento della superficie terrestre, che agiscono in modo molto incisivo solo lungo il loro percorso. Essi tendono ad abbassare il loro alveo al **livello base**, al di sotto del quale non possono più svolgere attività erosiva; il livello base definitivo corrispon-

Livello base  
dell'alveo

### IL LOESS

È un deposito eolico formato da sabbia fine e limo di origine glaciale, in quanto deriva dai depositi morenici (materiali erosi, trasportati e depositati dai ghiacciai), privi di copertura vegetale: le correnti d'aria trascinano via in sospensione da tali depositi la frazione fine del sedimento e la depositano là dove perdono di energia (per esempio, quando urtano contro un ostacolo: ai piedi di quest'ultimo il loess si accumula in masse di colore giallo-grigio, dagli spessori notevoli, fino a decine di metri).

I più grandi depositi di loess si formarono durante le glaciazioni pleistoceniche, periodi caratterizzati sia dall'erosione diretta dei ghiacciai, sia dal denudamento dei versanti conseguente alla mutazione climatica, che distrusse il manto di alberi e di erbe adattate alle condizioni di temperatura e di piovosità dei periodi interglaciali (v. cap. 16).

Vasti accumuli di loess, che raggiungono lo spessore di 90 m, si trovano in Cina settentrionale; sono portati dal vento che, fin dai periodi glaciali, spazza i deserti artici siberiani spirando dal polo Nord verso sud. In Italia, il loess costituisce una stretta fascia continua di depositi ai piedi della Collina di Torino e di quasi tutto l'Appennino emiliano. Tali rilievi costituivano i primi ostacoli incontrati dai venti provenienti dalle vallate alpine, festonate al loro sbocco dagli anfiteatri morenici creati dalle avanzate glaciali (probabilmente in corrispondenza delle glaciazioni verificatesi nell'era quaternaria).

A seconda degli ambienti di sedimentazione, esistono diversi sottotipi di loess: quello deposto in acqua, quello fluitato da correnti idriche, quello rimaneggiato in ambiente aereo.

de al livello marino, ma si può anche individuare un livello base provvisorio, che corrisponde alla confluenza del fiume con un altro corso d'acqua.

Come gli altri agenti geomorfologici, anche i fiumi esercitano la loro azione attraverso l'erosione, il trasporto e il deposito: mentre le modalità di trasporto fluviali sono state trattate nel capitolo 20, di seguito ci occuperemo delle principali forme di erosione e di deposito fluviali e descriveremo infine la "vita" di un fiume, analizzandone il ciclo di erosione.

### ■ Le forme d'erosione

Fattori dell'attività erosiva

L'attività erosiva di un fiume dipende dalle caratteristiche delle rocce su cui scorre, dalla pendenza dell'alveo e dalla portata del fiume, caratteristiche queste ultime che determinano la velocità delle acque; inoltre, l'abrasione delle rocce da parte di un fiume è aumentata dalla presenza nelle acque dei materiali trasportati; a questa attività di tipo meccanico se ne aggiunge anche una di tipo chimico, di corrosione più o meno veloce delle rocce su cui l'acqua scorre. Le forme di erosione tipiche di un fiume sono le valli fluviali e le cascate.

Valli fluviali

Le **valli fluviali** presentano un profilo trasversale a forma di "V", poiché l'erosione fluviale è attiva solo lungo il fondovalle, dove si trova l'alveo del fiume, mentre sui fianchi della valle sono attivi fenomeni di degradazione meteorica, che in genere agiscono più lentamente (se l'erosione del fondovalle procede molto più rapidamente di quella dei fianchi, si origina una valle molto stretta, dai fianchi quasi verticali, a cui si dà il nome di **gola**).

Cascate

Le **cascate** corrispondono a salti bruschi del letto fluviale, sovente dovuti a discontinuità tettoniche. Sono forme effimere, destinate ad attenuarsi per l'erosione della corrente. Questa, particolarmente energica data la velocità assunta nella caduta, nell'impatto alla base del gradino acquista un moto vorticoso e, grazie anche alla presenza di materiali grossolani trasportati, intaglia nella roccia affiorante delle cavità subsferiche, dette **marmitte dei giganti**, che favoriscono il crollo progressivo della scarpata. Nel tempo, la cascata si trasforma in una **rapida**, cioè un tratto di fiume a forte pendenza.

### ■ Le forme di deposito

Conoide di deiezione

Le forme di deposito fluviale più tipiche sono i conoidi di deiezione e le pianure alluvionali.

I **conoidi di deiezione** sono depositi a forma conica o a ventaglio, con apice rivolto a monte e con profilo trasversale convesso. Sono formati da sedimenti grossolani, disposti in

bande longitudinali a raggiera, che si depositano dove il fiume, uscendo da una ripida valle, sbocca improvvisamente in pianura: in questo punto, la diminuzione della velocità delle acque provoca il deposito dei materiali trasportati e la formazione del conoide.

Le **pianure alluvionali** si formano, invece, per deposito dei detriti trasportati da un fiume, che progressivamente riempiono zone depresse (estesi bacini lacustri o bracci di mare): la sedimentazione fluviale tende ad alzare l'alveo e col tempo gli argini non sono più in grado di contenere le acque, che tracimano provocando alluvioni che depositano i materiali più fini sulla pianura circostante. Un esempio di pianura alluvionale è la Pianura Padana, formatasi per riempimento di un braccio di mare a opera del Po e dei suoi affluenti.

Pianure alluvionali

## ■ Il ciclo di erosione fluviale

Con la loro azione di erosione, trasporto e deposito, i fiumi non solo modellano il territorio in cui scorrono, ma modificano continuamente anche la loro pendenza: osservando il profilo longitudinale di un fiume dalla sorgente alla foce, si nota che la pendenza è massima nell'alto corso del fiume e decresce verso la foce. I fiumi tendono a ridurre le differenze di pendenza e a raggiungere un **profilo d'equilibrio**, caratterizzato cioè da una pendenza tale che l'energia della corrente non è più in grado di erodere: tuttavia questa è una situazione ideale, che nessuno dei fiumi sulla Terra ha raggiunto.

Il profilo d'equilibrio

Per spiegare le caratteristiche morfologiche di diverse aree della Terra, all'inizio del '900 il geomorfologo americano W. M. Davis propose il concetto di **ciclo di erosione fluviale**, costituito dall'insieme di tre fasi della vita di un fiume, ciascuna caratterizzata da particolari aspetti del territorio: la giovinezza, la maturità e la vecchiaia.

Ciclo d'erosione

**Giovinezza.** L'area percorsa dal fiume è sollevata rispetto al livello di base (per esempio, a seguito di un'orogenesi) e presenta notevoli dislivelli; la maggiore pendenza fa sì che prevalga l'erosione. Il rilievo rapidamente si attenua, mentre le correnti trasportano e depositano a valle i sedimenti erosi.

Giovinezza

**Maturità.** Il modellamento ha ridotto i dislivelli lungo il corso del fiume, la velocità delle acque si è attenuata e prevale l'azione di trasporto. Lo spazio fisico è ora costituito da profili addolciti e da fondovalle alluvionati.

Maturità

**Vecchiaia.** Il paesaggio naturale diventa ancora più morbido; gli spartiacque si abbassano e le pendenze dell'alveo si riducono, in modo che l'energia della corrente è appena sufficiente per il trasporto di se stessa. La regione è ormai spia-

Vecchiaia

nata. Lo spazio fisico si è trasformato in un **penepiano**, cioè in una superficie “quasi piana”. I pendii addolciti fungono da spartiacque tra valli allargate e alluvionate. I corsi d'acqua che drenano un bacino “peneplanizzato” hanno una pendenza tale che l'energia della corrente non è più in grado di erodere.

Un tale fiume, se esistesse, avrebbe raggiunto il proprio profilo d'equilibrio definitivo, rappresentabile dalla sorgente alla foce con una curva uniformemente concava verso l'alto e tendente al livello di base. Ma, come abbiamo detto prima, questo quadro di perfetta stabilità è solo teorico.

Ciò è dovuto al fatto che variazioni climatiche, o la ripresa dei fenomeni endogeni, provocano un'interruzione del ciclo di erosione e modificazioni dei processi di modellamento: si verifica, cioè, un **ringiovanimento del rilievo** e ha inizio un **nuovo ciclo di erosione**.

Ringiovanimento

## 21.6 L'azione geomorfologica dei ghiacciai

Anche i ghiacciai, con il loro lento e impercettibile movimento, sono agenti di modellamento della superficie terrestre, pur se di minore estensione rispetto a quella interessata da altri agenti geomorfologici: infatti, i ghiacciai agiscono prevalentemente in aree situate al di sopra del limite delle nevi perenni.

Il movimento dei ghiacciai avviene con modalità diverse rispetto alle correnti fluviali. In particolare, la massa solida del ghiacciaio, a differenza di un fiume:

- è in grado di **superare contropendenze lievi**, muovendosi anche in senso opposto rispetto al verso della gravità;
- **non fa riferimento a un livello di base**: in grandi volumi, è in grado di scavare il substrato scendendo anche al di sotto del livello marino (fenomeno a cui si dà il nome di **sovraescavazione glaciale**), azione che un fiume non è fisicamente in grado di compiere;
- in presenza di un ostacolo è in grado di **dividersi in rami divergenti** (fenomeno avvenuto, per esempio, nel grande ghiacciaio che scendeva dalla Valtellina e che ha scavato le valli che accolgono oggi i due bracci del lago di Como);
- si comporta **nei confronti del materiale eroso come un nastro trasportatore**, trasferendolo senza rotolio e urti reciproci dei granuli, che quindi, non usurati, risultano spigolosi; solo quelli incastonati nel ghiaccio, alla periferia della massa, e quindi costretti a sfregare contro la roccia incassante, presentano in superficie tipiche striature parallele dovute all'attrito (ciottoli striati).

Caratteristiche  
del movimento  
dei ghiacciai

## ■ I meccanismi dell'erosione

Il ghiacciaio in movimento esercita un'intensa azione erosiva, chiamata **esarazione**, che può esplicarsi tramite l'abrasione o lo sradicamento.

L'**abrasione** è dovuta ai ciottoli o ai frammenti di roccia solidamente incastrati nella massa di ghiaccio, che entrano in contatto con il substrato su cui il ghiacciaio si muove. L'intensità dell'azione abrasiva dipende dal tipo di rocce costituenti sia il substrato, sia i materiali detritici trasportati dal ghiaccio, dalla velocità dello spostamento e dal volume del ghiaccio.

Lo **sradicamento** consiste nella rimozione di blocchi interi di substrato, che vengono estirpati dalla spinta della massa, particolarmente energetica in profondità. Sono più facilmente soggette al fenomeno masse rocciose fagliate o che hanno subito gli effetti del crioclastismo.

## ■ Le forme d'erosione

Tra le forme d'erosione dei ghiacciai si ricordano le valli glaciali, i circhi glaciali e le rocce montonate.

La **valle glaciale** presenta un tipico profilo trasversale a "U", con fondo largo e piatto e fianchi ripidi, dovuto al meccanismo erosivo del ghiacciaio, che, contrariamente a quanto avviene per un fiume, si esercita lungo tutta la sezione di contatto tra il ghiaccio e la roccia incassante.

Il **circo glaciale** ha la forma di una conca, circondata su tre lati da una corona di creste e con soglia talora in contropendenza che la raccorda con il resto della valle glaciale. È scavato dal bacino collettore, che esercita una sorta di erosione regressiva sui versanti incassanti.

Le **rocce montonate** sono dossi rocciosi arrotondati e allungati nella direzione di scorrimento del ghiaccio, costituiti da affioramenti di rocce più difficilmente erodibili e modellate dall'esarazione. L'abrasione vi scava solchi paralleli: dalla direzione del loro allungamento è possibile risalire alla direzione e al verso in cui è avvenuto il movimento del ghiacciaio.

## ■ Le forme di deposito

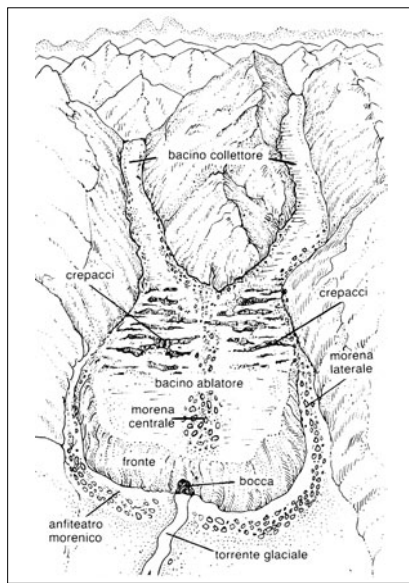
Tra le forme di deposito glaciale si citano le morene e i massi erratici.

Le **morene** sono depositi formati da materiali di diverso diametro, ammassati caoticamente senza alcun cenno di stratificazione, derivanti in parte da processi di esarazione e in parte da crolli dai versanti sul ghiacciaio (fig. 21.3).

A seconda della posizione è possibile distinguerne vari tipi:

- **morena di fondo**, che occupa l'interfaccia tra il ghiaccio e la roccia sottostante;





**Figura 21.3**  
Schema di un ghiacciaio di tipo alpino in cui si evidenziano morene e anfiteatro morenico.

Morena intermedia

● **morena intermedia**, formata dai materiali che sono incastonati nella massa di ghiaccio (per esempio, morene superficiali sepolte dalle nevicate degli anni successivi);

Morena laterale

● **morena laterale**, che si configura come un doppio nastro sui bordi della lingua glaciale, a contatto con i versanti che la riforniscono di materiale terrigeno (frammenti di rocce e di suolo) tramite crolli e frane;

Morena mediana

● **morena mediana**, striscia rilevata di materiale terrigeno, deposta sulla superficie della lingua parallelamente al suo asse maggiore, che si origina in seguito all'unione di due morene laterali contigue alla confluenza di due lingue glaciali;

Morena frontale

● **morena frontale**, che deriva dall'unione di tutti i tipi di morena che confluiscono insieme all'apice della lingua glaciale, via via che il ghiaccio si scioglie; forma in genere un arco a concavità rivolta verso monte e ad apici rastremati. I ghiacciai vallivi, dopo avere raggiunto il loro massimo sviluppo durante le glaciazioni dell'era quaternaria, nei periodi interglaciali si ritirarono, abbandonando sul terreno le morene che avevano trasportato: il ritiro dei ghiacciai, avvenuto attraverso il susseguirsi di ritiri veloci e di fasi stazionarie, ha prodotto gli **anfiteatri morenici**, depositi formati da una serie di cordoni morenici a forma di anfiteatro. Gli anfiteatri

Anfiteatri morenici

sono oggi conservati solo in parte, perché anch'essi soggetti all'erosione. Tra i maggiori anfiteatri morenici in Italia ricordiamo quelli immediatamente a sud dei laghi prealpini Maggiore, di Como e di Garda e quello di Ivrea, in Piemonte. I **massi erratici** sono enormi blocchi di roccia trasportati a valle dal ghiacciaio e là abbandonati dopo il ritiro. Massi erratici

## 21.7 L'azione geomorfologica dei mari

Mentre gli agenti geomorfologici prima considerati esercitano la loro azione su una superficie, il mare agisce lungo una linea, la **linea di costa**, cioè la linea che segna il confine tra le terre emerse e il mare. L'azione geomorfologica del mare è dovuta soprattutto al moto ondoso e, in misura minore, anche alle correnti marine e alle maree (v. cap. 19) e può provocare l'arretramento della linea di costa, se prevale l'azione erosiva, o il suo avanzamento, se invece prevale l'azione di deposito. Nel complesso, il risultato dei due tipi di azione è una rettifica della linea di costa, che, col passare del tempo, subisce continue variazioni.

Esiste una grande varietà di coste, per la cui classificazione rinviamo al riquadro a p. 290.

### ■ Le forme d'erosione

L'attività erosiva del mare prende il nome di **abrasione marina** ed è dovuta non solo all'azione diretta delle onde, ma anche ai detriti che esse trasportano e che scagliano contro la costa.

Abrasione marina

Essa si manifesta soprattutto lungo le coste alte e rocciose, dove, per interferenza tra onda e fondale, l'azione dell'onda crea, in corrispondenza al livello medio del mare, un solco, detto **solco di battigia**, che va progressivamente approfondendosi; mancandole il sostegno, la parete rocciosa sovrastante crolla: il fenomeno è tipico delle **falesie**, coste alte e rocciose, a volte a strapiombo sul mare, che nel tempo arretrano verso il continente, lasciando il posto a una **piattaforma d'erosione**.

Solco di battigia, falesie, piattaforme di erosione

### ■ Le forme di deposito

Lungo le coste basse prevale l'azione di deposito dei detriti trasportati dal mare, che si verifica quando, per motivi diversi, la velocità delle onde e delle correnti marine diminuisce. Si formano in questo modo le **spiagge**, costituite da materiale sciolto e di piccole dimensioni (ciottoli, ghiaie e sabbie), che degradano dolcemente verso il mare e la cui larghezza può variare a seconda della pendenza della spiaggia,

Spiagge

del tipo di moto ondoso e dell'altezza delle maree: su coste oceaniche piatte, caratterizzate da alte e basse maree particolarmente pronunciate, la spiaggia può essere larga anche parecchi chilometri. Sovente la spiaggia è conclusa verso la terraferma da un **cordone di dune**, a volte lungo molti chilometri, **parallelo alla battigia** (la zona della spiaggia battuta dalle onde) e che deriva dall'accumulo di sabbia in presenza di venti dominanti.

## Lidi e lagune

A volte i detriti vengono depositati in mare a una certa distanza dalla linea di costa, dove le onde dirette verso la costa e la risacca (l'onda di ritorno) si incontrano e si annullano: si forma così un **cordone litoraneo sottomarino**, che col passare del tempo può emergere e originare un **lido**, sorta di isola allungata, parallela alla costa. Collegandosi alla terraferma, i lidi possono delimitare e isolare tratti di mare e dare origine alle **lagune**, specchi d'acqua in cui è ridotta la comunicazione col mare aperto.

## LA CLASSIFICAZIONE DELLE COSTE

La classificazione delle coste può basarsi sulla loro morfologia o sulla loro origine. In base alla **classificazione morfologica** si distinguono:

- **coste alte e profonde**, ripide, strapiombanti in mare a falesia, con scarpate verticali che continuano anche al di sotto del livello marino;

- **coste alte con spiaggia**, dove a un tratto emerso molto alto segue un arenile che si sommerge gradualmente. Sovente derivano dalle prime, per crollo di parte del versante, accumulo alla base dei materiali provenienti dal crollo e loro redistribuzione a opera dei movimenti marini;

- **coste a ripe arretrate con spiaggia**, dove una spianata litoranea più o meno spaziosa è conclusa verso la terraferma da un gradino morfologico, che può avere origini diverse (una faglia, una scarpata di un antico terrazzo marino ecc.).

- **coste basse**, caratteristiche delle zone dove una pianura alluvionale costiera si sommerge gradualmente nello specchio marino antistante.

La **classificazione in base all'origine** tiene conto della genesi della costa; si distinguono:

- **coste di origine endogena**, che comprendono le coste tettoniche: per esempio, le coste vulcaniche che sono spesso ripide, in particolare dove l'attività vulcanica è ancora in corso e periodicamente riversa lave in mare; a seconda del materiale di cui sono costituite (ceneri, colate laviche, tufi ecc.) possono essere più o meno erodibili.

- **coste di origine morfologica**, dette rias se derivano da antiche valli fluviali, o fiordi, se derivano da valli glaciali, modellate durante le fasi di oscillazione del livello medio del mare collegate con le grandi glaciazioni (oscillazioni eustatiche), poi invase dall'ingressione marina durante periodi interglaciali.

- **coste di origine biologica**, che derivano dall'azione costruttiva degli organismi marini (barriere coralline). Le più importanti sono quelle tropicali di origine madreporica. Le barriere sono formazioni più estese, sviluppate parallelamente alle coste e separate da queste da una fascia di laguna. Le isole madreporiche hanno per lo più forma ad atollo, una corona circolare emersa, che racchiude una laguna centrale, collegata con il mare aperto attraverso una o più interruzioni.

## GLOSSARIO

### **Anfiteatro morenico**

Insieme di cerchie moreniche frontali deposte da un ghiacciaio al suo sbocco in pianura.

### **Cascata**

Salto con cui i corsi d'acqua superano improvvise e brusche rotture di pendenza presenti lungo l'alveo di un fiume.

### **Conoide alluvionale**

Accumulo di detriti depositati da un corso d'acqua allo sbocco di una valle in pianura o sul fondo di un'altra valle.

### **Corrasione**

Azione meccanica esercitata dal vento sulle superfici rocciose mediante granuli di sabbia e limo che trascina con sé.

### **Deflazione**

Azione di sollevamento e di trasporto di materiale fine a opera del vento, tipica delle regioni aride.

### **Fiordo**

Profonda insenatura costiera formatasi

per parziale sommersione da parte del mare di una preesistente valle glaciale.

### **Masso erratico**

Blocco roccioso trasportato dal ghiacciaio e poi abbandonato durante la fase di ritiro.

### **Meandro**

Ansa che di solito caratterizza il corso inferiore di un fiume.

### **Morena**

Accumulo di frammenti rocciosi che i ghiacciai trascinano con sé nel movimento verso valle.

### **Oscillazioni eustatiche**

Variazioni del livello marino dovute all'alternarsi di glaciazioni e periodi interglaciali.

### **Rias**

Profonda insenatura costiera formatasi per parziale sommersione di una preesistente valle fluviale da parte delle acque del mare.

## TEST DI VERIFICA

**1 Il ghiacciaio in movimento esercita un'intensa azione erosiva chiamata:**

- a** saltazione;
- b** ablazione;
- c** esarazione;
- d** deflazione.

**2 Il deposito glaciale che si configura come un doppio nastro sui bordi della lingua a contatto con i versanti è chiamato:**

- a** morena di fondo;
- b** morena intermedia;
- c** morena laterale;
- d** morena mediana.

**3 Tra le seguenti, indica le forme di erosione fluviale:**

- a** valle con trasversale a "U";
- b** cascate;
- c** rapida;
- d** conoidi alluvionali;
- e** delta.

**4 Quale di queste forme di deposito è dovuta all'azione del vento?**

- a** conoidi alluvionali;
- b** dune;
- c** pianura alluvionale;
- d** massi erratici.

**5 Quali di questi non sono fenomeni di disgregazione fisica delle rocce?**

- a** carsismo;
- b** termoclastismo;
- c** crioclastismo;
- d** idrolisi.

**R**

1 d; 2 c; 3 b; c; 4 b; 5 a, d.

# 22 Il suolo

---

Lo strato superficiale della crosta terrestre in cui le piante affondano le loro radici è detto **suolo**: esso deriva dalla disgregazione fisica e dall'alterazione chimica delle rocce affioranti, dovute all'azione dell'atmosfera e degli organismi viventi, sia vegetali sia animali.

Il suolo è costituito da una **componente minerale**, proveniente dalla degradazione delle rocce, e da una **componente organica**, detta **humus**, formata dalla decomposizione dei resti degli organismi viventi; esso, inoltre, contiene **acqua** e **aria**.

In un suolo si possono riconoscere diversi strati, ciascuno con particolari caratteristiche, detti **orizzonti**, che nel loro insieme costituiscono il **profilo** di un suolo.

Dalla composizione di un suolo dipendono alcune caratteristiche, quali per esempio la **tessitura**, la **porosità** e la **struttura**, che lo rendono più o meno adatto allo sviluppo delle piante e da cui dipendono anche alcuni processi che nel suolo si svolgono.

## 22.1 La genesi dei suoli

Un **suolo** è la parte più superficiale della crosta terrestre, comunemente detto anche **terreno**, dello spessore variabile da pochi centimetri a qualche metro e in cui si sviluppano le radici delle piante.

Il suolo si origina attraverso un lento e lungo processo di disgregazione fisica e di alterazione chimica delle rocce, operato sia dall'atmosfera, sia dagli organismi viventi, vegetali e animali.

I processi che disgregano e alterano le rocce esposte agli agenti atmosferici (v. cap. 21) generano prodotti di disfacimento (**detriti incoerenti**), che possono accumularsi in loco oppure subire destini diversi: possono essere trasportati da agenti quali i ghiacciai, il vento e i corsi d'acqua e accumularsi altrove. L'accumulo dei prodotti del disfacimento meteorico crea una **coltre**, o **mantello detritico**, che a seconda delle condizioni può costituire una pellicola sottile, dello spessore di pochi centimetri, oppure raggiungere lo spessore di parecchi metri.

Sulla coltre di materiale detritico e anche sulla roccia inalterata si insediano **organismi pionieri**, cioè i primi organismi – quali licheni, batteri, alghe e muschi – che contribuiscono all'alterazione della roccia o dei detriti rocciosi attraverso

Il mantello detritico, o coltre

Organismi pionieri

un'azione di tipo biochimico, per mezzo di sostanze che essi stessi producono. L'**accumularsi dei loro residui organici** permette la formazione di un sottile strato che rende ora possibile anche l'**insediamento di piante più esigenti** – dapprima erbe, poi arbusti e infine alberi – le quali continuano ad agire sul substrato roccioso anche attraverso un'azione di tipo meccanico, penetrando a forza con le loro radici tra le fessure presenti nella roccia e contribuendo a disgregarla. **Successivamente anche protozoi e organismi animali** (per esempio, anellidi, nematodi, larve di insetti e molluschi) partecipano alla formazione del suolo. I resti di tutti gli organismi vegetali e animali vengono poi decomposti da diversi microrganismi e **generano l'humus** (v. par. 22.2).

L'insieme dei processi che portano alla formazione di un suolo è detto **pedogenesi** (dal greco *pédon*, terreno); la **pedologia** è la scienza che studia i suoli, la loro composizione, le loro caratteristiche, la loro origine e la loro evoluzione.

### ■ Fattori che influenzano la genesi dei suoli

La genesi dei suoli è influenzata da alcuni fattori, tra i quali ricordiamo il clima, la natura delle rocce e la giacitura del suolo.

Il clima

● **Clima.** È il principale fattore che determina le caratteristiche di un suolo; in particolare, la temperatura, l'umidità atmosferica e le precipitazioni incidono sulla maggiore o minore velocità di degradazione delle rocce. Come si è visto nel capitolo 21, la temperatura agisce sulle rocce disgregandole fisicamente, mentre è soprattutto l'umidità, associata a temperature elevate, a determinare l'alterazione chimica delle rocce. Per questo motivo, spostandosi dall'Equatore verso i poli, è possibile riconoscere una successione di suoli, legata alla distribuzione dei diversi tipi climatici (tab. 22.1). Là dove esistono le stesse condizioni climatiche, anche i suoli sono simili, pur appartenendo a regioni anche molto distanti fra loro: così il permafrost, il suolo perennemente gelato della tundra siberiana, è identico a quello del Grande Nord canadese o dell'Alaska; le terre rosse del Carso triestino si ritrovano anche sugli altipiani carbonatici della Penisola Iberica o di quella balcanica.

La natura  
delle rocce

● **Natura delle rocce.** Dalla composizione chimica delle rocce dipendono le caratteristiche chimiche di un suolo. Inoltre, il loro maggiore o minore grado di compattezza determina la velocità di alterazione e di formazione dei suoli.

La giacitura  
del suolo

● **Giacitura del suolo.** Con questo termine si indica la pendenza di un suolo; in presenza di forti pendenze, i materiali provenienti dalla degradazione delle rocce non si accu-

**Tabella 22.1** La classificazione dei suoli

TIPI	CARATTERISTICHE
<b>non evoluti</b>	a minerali greggi, presenti nelle regioni artiche e desertiche
<b>poco evoluti o ranker</b>	sono suoli giovani, che giacciono direttamente su una roccia madre silicea, tipici delle regioni di alta montagna
<b>calcarei</b>	si formano su rocce ricche in carbonato di calcio. Tra i suoli calcarei vi sono i cernozem, terre nere di fertilità eccezionale, che si trovano nelle steppe della Russia meridionale. Si formano nella zona temperata continentale a scarsa piovosità (meno di 400 mm all'anno), dove vi è una fitta copertura di graminacee xerofile che forniscono abbondante materiale organico, ricco di calcio. Un altro tipo di suolo calcareo è il rendzina, che si può formare in qualunque tipo di clima. È costituito da un solo orizzonte con copertura erbosa secca, in quanto manca di riserve di acqua
<b>evoluti a mull</b>	un tipo di humus della zona temperata, caratteristico delle foreste di latifoglie
<b>evoluti a podsol</b>	tipici di climi umidi e temperati freddi, caratterizzati dalla presenza di un orizzonte grigio chiaro che contiene solo silice, che è sottostante a un orizzonte organico formato da sostanze vegetali non totalmente decomposte. Costituiscono la metà dei terreni europei e in Italia si trovano ai piedi delle Alpi e in diverse aree della pianura
<b>lateritici</b>	molto ricchi in ossidi di ferro o di alluminio, che si formano in climi caldi con alternanze di periodi secchi e umidi, sono tipici dei territori tropicali deforestati
<b>alomorfi</b>	caratterizzati dalla presenza di un livello di sale
<b>idromorfi</b>	caratterizzati dalla presenza temporanea o permanente dell'acqua. In questo tipo di suoli vi è sempre un orizzonte nel quale l'elevato grado di umidità porta a una forte concentrazione di argilla e di ossidi di ferro, denominato orizzonte glej
<b>idromorfi organici</b>	caratterizzati da un intreccio di fibre e frammenti di vegetali più o meno carbonizzati con un'elevata percentuale di acqua. Da questi suoli possono trarre origine le torbe

mulano in loco, ma vengono facilmente allontanati dalla forza di gravità o asportati dalle acque dilavanti. In simili situazioni non possono formarsi suoli di notevole spessore; il materiale asportato può accumularsi alla base del pendio, dando origine alla **coltre colluviale**. Altre volte può arrivare fino alle acque incanalate del reticolo idrografico, essere trasportato dai fiumi sotto forma di torbida e, successivamente, essere sedimentato formando una **coltre alluvionale**.

In zone pianeggianti possono invece formarsi suoli di spessore maggiore, poiché i materiali di degradazione della roccia rimangono in loco e subiscono un'ulteriore alterazione anche a opera di organismi viventi.

## 22.2 La composizione dei suoli

I suoli sono dei miscugli eterogenei, formati da una parte solida, distinta in componente minerale, o inorganica, e componente organica, da una parte liquida, acqua, e da una componente gassosa, aria.



Classificazione  
secondo  
la dimensione  
dei granuli

### ■ La componente minerale

È la frazione che proviene dalla degradazione delle rocce e costituisce oltre il 95% della parte solida di un suolo.

**Si distinguono alcune frazioni a seconda della dimensione dei granuli** che le compongono:

- **scheletro** (diametro dei granuli > 2 mm);
- **sabbia grossolana** (diametro dei granuli fra 2 e 0,2 mm);
- **sabbia fine** (diametro dei granuli fra 0,2 e 0,02 mm);
- **limo** (diametro dei granuli fra 0,02 mm e  $2\ \mu$ );
- **argille** (diametro dei granuli <  $2\ \mu$ ).

L'humus

### ■ La componente organica

Comprende i **resti decomposti dei numerosi organismi che vivono nel suolo o che su di esso si accumulano**: tra essi ricordiamo batteri, actinomiceti, funghi, lombrichi, artropodi, acari, piccoli mammiferi e numerose specie vegetali. Le spoglie degli animali e i residui della vegetazione vengono rapidamente attaccati da diversi organismi terricoli, formando una miscela di sostanze organiche decomposte detta **humus**, che viene poi a poco a poco mineralizzato (cioè trasformato in sostanze inorganiche), soprattutto a opera di funghi e batteri.

La mineralizzazione  
dell'humus

La velocità dei processi che portano alla mineralizzazione dell'humus varia a seconda delle caratteristiche dei suoli: è elevata in quelli freschi e ricchi di pori o fessure, quindi ben aerati, dotati di una ricca vita batterica e animale, in particolare di lombrichi; è bassa in suoli intasati d'acqua, asfittici e poveri di vita batterica, in cui si creano condizioni sfavorevoli all'attività biologica (in tal caso la sostanza organica si accumula in superficie in spesse coltri).

A seconda di come procede la mineralizzazione, si formano diversi tipi di humus. I più importanti sono:

Mull

- **mull**, di colore bruno o nero, frutto di decomposizione rapida;

Moder

- **moder**, la lettiera, cioè lo strato di residui vegetali che si accumulano sopra al suolo e che si decompongono meno rapidamente rispetto al mull; il colore è bruno per la maggiore separazione tra elementi organici e inorganici;

Mor

- **mor**, detto anche humus grezzo, frutto di processi di decomposizione particolarmente lenti: è spesso, nerastro, formato di parti ancora indecomposte e di prodotti intermedi sovente legati dal fitto intreccio di ife (micelio) dei funghi;

Torba

- **torba**, costituita da una coltre di sostanza organica indecomposta, in parte vivente, formata in prevalenza da muschi e sfagni, ricoprente un suolo sottostante sovente saturo d'acqua.

## ■ L'acqua

L'acqua, contenuta negli interstizi presenti tra i componenti solidi di un suolo, è **in realtà una soluzione molto diluita di sali minerali**, distinta in:

- **acqua igroscopica**, assorbita dall'umidità dell'aria; forma una sottile pellicola attorno alle singole particelle del suolo, dalle quali è energeticamente trattenuta, tanto da non poter essere utilizzata dalle radici delle piante; Acqua igroscopica

- **acqua capillare**, contenuta negli spazi più esigui, solo in parte disponibile per l'assorbimento radicale; costituisce la riserva idrica per le piante durante le stagioni aride; Acqua capillare

- **acqua di gravità**, che va a colmare i pori più grossolani ed è soggetta alla gravità; percola in profondità tanto più rapidamente quanto più grandi sono gli spazi vuoti. È utilizzata dalle piante durante i periodi piovosi e nei giorni successivi, quando parte del liquido continua a occupare gli spazi intergranulari. Acqua di gravità

L'acqua del suolo a disposizione della vegetazione costituisce la **riserva idrica**. La sua misura è un parametro indispensabile per la programmazione dell'uso agricolo delle terre. La riserva idrica può essere determinata sul campo con metodi empirici ma sufficientemente precisi. Riserva idrica

## ■ L'aria

Nei suoli l'aria occupa gli interstizi lasciati liberi dall'acqua. Essa contiene gli stessi gas presenti nell'atmosfera, se pur in percentuali diverse; in particolare, rispetto a quest'ultima ha un **maggiore contenuto di anidride carbonica** e un **minore contenuto di ossigeno**: le percentuali dei due gas variano inoltre con la profondità (quella dell'anidride carbonica aumenta e quella dell'ossigeno diminuisce) e con la stagione (la percentuale di entrambi nella stagione asciutta è maggiore rispetto a quella umida).

Di particolare importanza è l'ossigeno, indispensabile sia per gli apparati radicali delle piante, sia per tutti i processi biologici che si svolgono nel suolo (soprattutto a opera di funghi e batteri).

Importante è anche la presenza di azoto nell'aria del suolo, in quanto attraverso la sua fissazione a opera di batteri (detti appunto azotofissatori) si producono composti dell'azoto utilizzabili dalle piante.

Più anidride carbonica e meno ossigeno

## 22.3 Il profilo dei suoli

Un suolo si compone di diversi **orizzonti, livelli sovrapposti distinguibili** tra loro **a occhio nudo** in base alle loro ca- Gli orizzonti

Orizzonte O, o lettiera	<p>ratteristiche fisiche e chimiche; la successione degli orizzonti costituisce il <b>profilo</b> di un suolo.</p> <p>Procedendo dalla superficie in profondità, gli orizzonti sono contraddistinti dalle lettere O, A, B, C e R. Non tutti gli orizzonti pedologici sono presenti in tutti i suoli.</p> <p>● <b>Orizzonte O</b>: è lo strato più superficiale; di spessore limitato, formato di sostanza organica indecomposta o solo parzialmente decomposta, viene anche indicato col nome di <b>lettiera</b>.</p>
Orizzonte A, od orizzonte eluviale	<p>● <b>Orizzonte A</b>: è lo strato più ricco di sostanza organica, in cui è particolarmente spiccata l'attività di decomposizione. Viene anche detto <b>orizzonte eluviale</b>, poiché in esso è intensa l'asportazione dei componenti solubili, inorganici e organici a opera dell'acqua che s'infiltra nel suolo e li trasporta nell'orizzonte sottostante. Esso può essere ulteriormente suddiviso in sottorizzonti A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> e A<sub>3</sub>, con caratteristiche intermedie.</p>
Orizzonte B, od orizzonte illuviale	<p>● <b>Orizzonte B</b>: è più povero di humus rispetto all'orizzonte A; viene anche detto <b>orizzonte illuviale</b>, poiché è quello in cui si concentrano i materiali asportati dalle acque dall'orizzonte superiore. Anche in questo orizzonte si possono distinguere dei sottorizzonti B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub> e B<sub>3</sub>.</p>
Orizzonte C	<p>● <b>Orizzonte C</b>: si tratta dello strato più profondo del suolo, costituito dalla roccia in via di alterazione. In esso può essere presente un sottile strato di colore grigio, verdastro o rossiccio, formato da minerali di ferro associati all'argilla, a cui si dà il nome di <b>gley</b>. Anche in questo orizzonte si distinguono sottorizzonti: sono indicati con C<sub>1</sub> quelli dove il grado di degradazione della roccia è più avanzato, con C<sub>2</sub> quelli dove lo è meno.</p>
Orizzonte R	<p>● <b>Orizzonte R</b>: è il simbolo che indica la roccia-madre inalterata sottostante il suolo.</p>

## 22.4 Alcune caratteristiche dei suoli

Tra le numerose caratteristiche di un suolo, alcune sono particolarmente importanti per gli organismi che in essi vivono, per lo sviluppo della vegetazione e per i processi di decomposizione che in esso avvengono. Tali caratteristiche comprendono: la tessitura, la porosità, la struttura, il colore e le attività di scambio.

### ■ Tessitura

La **tessitura** di un suolo, detta anche **grana**, corrisponde alla **percentuale relativa di scheletro, sabbia, limo e argilla** presenti in un suolo. La tessitura è molto importante per de-

terminare altre caratteristiche di un suolo. Per esempio, quando lo scheletro o la sabbia sono troppo abbondanti, il terreno tende a essere arido, in quanto l'acqua percola rapidamente a causa dei grossi interstizi presenti tra i granuli. Se invece è la frazione argillosa a essere prevalente, in conseguenza dell'igroscopicità di quei minerali (che tendono a gonfiarsi), pori e fessure si chiudono, l'aria non circola più, l'ambiente diventa asfittico e la respirazione radicale è impedita. Problemi simili sono determinati anche da una presenza eccessiva di limo.

I suoli più fertili sono quelli a **medio impasto**, che sono equilibrati per quanto riguarda la tessitura; in essi lo scheletro è assente e i contenuti percentuali degli altri componenti sono i seguenti: sabbia grossa 30-50%, sabbia fine 15-30%, limo 10-15%, argilla 5-10%, calcare 1-5%, sostanza organica 3-5%.

Il suolo più fertile a medio impasto

## ■ Porosità

La porosità indica il grado in cui un suolo è permeato da pori e interstizi ed è espressa come rapporto tra volume degli spazi vuoti e il volume totale del suolo.

La presenza di pori nel suolo è importante, poiché **permette la circolazione di acqua e di aria** e quindi assicura condizioni favorevoli allo sviluppo della vegetazione. La porosità dipende dalla tessitura di un suolo (è maggiore in suoli in cui prevalgono granuli di dimensioni maggiori), ma può anche essere incrementata dagli organismi che vivono nel suolo, (per esempio, attraverso gallerie scavate da larve di insetti, da lombrichi e da altri animali o dalla penetrazione delle radici che, terminato il loro ciclo vitale, vanno in decomposizione).

Condizione per la circolazione di acqua e aria

## ■ La struttura

Per **struttura di un suolo** s'intende la **disposizione spaziale reciproca dei granuli** che lo costituiscono.

Si distinguono una struttura granulare e una struttura glomerulare.

Nella **struttura granulare**, i diversi **granuli sono indipendenti gli uni dagli altri** e assumono la disposizione di massimo assestamento: se prevalgono granuli di maggiori dimensioni, anche gli interstizi sono grandi, se, invece, prevalgono i granuli più fini, sono presenti solo pori molto piccoli e in tal caso il suolo diventa compatto, privo di circolazione d'aria e di acqua e quindi asfittico.

Struttura granulare

Nella **struttura glomerulare**, invece, le **particelle di limo e di argilla danno luogo a fenomeni di aggregazione** e formano così grumi, detti anche glomeruli: in tal modo vi è una presenza sia di pori più grandi, sia di pori più piccoli, con-

Struttura glomerulare

dizione indispensabile per una buona circolazione dell'acqua e dell'aria e dunque per lo sviluppo della vita nel suolo.

### ■ Il colore

È un elemento diagnostico molto importante per individuare sia i materiali presenti, sia i processi in atto nel suolo. Le sfumature possibili sono moltissime e per riconoscerle in modo univoco occorre servirsi di tavole colorimetriche. In linea di massima e a titolo indicativo possiamo dire che il colore:

- Rosso ● **rosso denota la presenza del ferro**, che può trovarsi allo stato ossidato, come nei terreni aridi mediterranei o subtropicali (il suolo assume allora tonalità rosso-vive), oppure può essere più o meno ridotto (in questo caso si hanno sfumature rosso-bruno-giallastre);
- Bruno ● **bruno è rivelatore della presenza di sostanza organica**; quando l'humus è particolarmente abbondante il colore del suolo è nero;
- Grigio-azzurro ● **grigio-azzurro individua condizioni di scarsa ossigenazione**; sono grigiastri gli orizzonti dove il ferro si trova allo stato ridotto.

### ■ Attività di scambio

Il complesso  
di scambio

La sostanza organica e l'argilla presenti nei suoli formano una specie di "spugna", detta **complesso di scambio**. Essa è in grado di assorbire gli elementi minerali del suolo e di

## I PALEOSUOLI

Esistono situazioni particolari nelle quali si sono conservati suoli antichissimi, risalenti a centinaia di milioni di anni fa. In condizioni geomorfologiche particolarmente conservative (per esempio, se i suoli, a qualunque stadio di maturazione si trovino, vengono sepolti da nuovi sedimenti), possono originarsi i **paleosuoli** (letteralmente, suoli antichi), la cui evoluzione è iniziata molto tempo fa. Si tratta di suoli del tutto particolari, per certi aspetti veri e propri oggetti fossili, in grado di darci molte preziose informazioni sul passato recente. Possono essere definiti come "suoli che si sono formati in un paesaggio del passato" prima che ne cambiassero le condizioni ambientali, in particolare il clima e la vegetazione.

Mentre il pedologo "attuale", cioè che studia i suoli recenti, parte dal clima, dalla vegetazione e dalla roccia-madre per definire le caratteristiche di un suolo, al contrario il "paleopedologo" analizza il paleosuolo, la sua composizione e le sue caratteristiche per dedurre le caratteristiche climatiche e faunistiche dell'ambiente in cui si sono formati: infatti, con opportune indagini di laboratorio e sul campo, è possibile ricostruire in modo soddisfacente l'ambiente originario. Non tutti i paleosuoli sono uguali: il loro profilo, la successione degli orizzonti, il chimismo dipendono dai climi che si sono succeduti, dal materiale dal quale derivano e dalle vicende geodinamiche che li hanno interessati.

cederli gradualmente alle radici delle piante per le loro necessità vitali.

## LA POTENZIALITÀ DEI SUOLI

Lo studio dei suoli è in genere finalizzato al loro impiego, alla loro conservazione e al loro miglioramento.

La **potenzialità** di un suolo ne indica le possibilità d'impiego e deriva dalla quantificazione di alcuni parametri chimici, fisici e biologici. I parametri pedologici presi in considerazione, in quanto ritenuti i più importanti per determinare la fertilità (intesa come capacità di un suolo di dare dei prodotti agricoli) e l'adattabilità di un suolo ai vari usi possibili di tipo agro-silvo-pastorale, sono i seguenti:

- profondità del profilo;
- granulometria media (tessitura);
- struttura nei suoi vari aspetti fisici;
- condizioni interne di drenaggio;
- tipo di sostanza organica;
- riserve minerali (natura e consistenza).

Dalla moltiplicazione dei valori attribuiti a ciascuno dei parametri presi in esame, si arriva a determinare un indice percentuale che permette di inserire il tipo pedologico in una determinata classe di potenzialità. La carta delle potenzialità d'uso dei suoli italiani, a scala 1:1 000 000, prevede sette classi.

**Suoli a potenzialità elevata:** nessuna limitazione all'uso. Sono compresi i suoli alluvionali profondi a tessitura ben equilibrata, in particolare della Bassa Padana e di altri lembi alluvionali peninsulari e insulari.

**Suoli a potenzialità buona:** le limitazioni, moderate, si riferiscono a tessiture un po' squilibrate verso le ghiaie o le argille e a spessori modesti. Comprende suoli di pianura e di collina.

**Suoli a potenzialità moderata:** le carenze di spessore, di drenaggio, di saturazione, di struttura impongono interventi di miglioramento e pratiche culturali particolari. In questa classe sono compresi suoli diffusi sulle morene, sui rilievi calcareo-dolomiti, nella bassa montagna dell'Italia settentrionale e centromeridionale. Le col-

ture lasciano talvolta il posto al bosco ceduo e al pascolo.

**Suoli a potenzialità scarsa:** vi ricade circa il 40% del territorio nazionale. Comprende suoli esposti a rischi d'erosione notevoli, eccessivamente rocciosi o pietrosi e che hanno altre limitazioni quanto a granulometria, drenaggio e saturazione. Questi suoli possono essere coltivati con le tipiche colture mediterranee e là dove l'uomo è intervenuto con pratiche migliorative; su di essi, tuttavia, prevalgono il bosco e il pascolo.

**Suoli a potenzialità bassa:** le limitazioni sono tanto varie e severe da impedirne l'uso agricolo. I suoli di questa classe coprono circa il 10% della superficie nazionale e si trovano soprattutto in media montagna a pendenza accentuata. L'impiego è solo di tipo silvo-pastorale.

**Suoli a potenzialità molto bassa:** rientrano in questa classe i suoli diffusi sulla catena alpina o sulle recenti colate laviche degli apparati vulcanici.

**Suoli a potenzialità nulla:** questa classe comprende i suoli che fanno da substrato alla vegetazione pioniera. Essi passano lateralmente ai ghiacciai, alle morene in via di formazione o alla roccia affiorante soggetta a processi di crioclastismo.

I suoli compresi nelle ultime tre classi non devono essere considerati meno importanti degli altri solo perché non risultano coltivabili. Essenziale è la loro funzione sotto l'aspetto della difesa idrogeologica (v. cap. 23): a tal fine è importante che anche in Italia venga senza una particolare integrato di difesa del suolo e di riforestazione o, meglio ancora, di recupero integrato delle cosiddette terre marginali, cioè di quei suoli senza una particolare vocazione agricola. In questo caso, ovviamente, sarebbe necessaria una cartografia della potenzialità dei suoli di ben maggiore dettaglio di quella esistente.

## GLOSSARIO

**Detrito**

Frammento di materiale roccioso proveniente dalla disaggregazione delle rocce dovuta ad agenti naturali.

**Humus**

Complesso di sostanze organiche del terreno derivate dalla decomposizione delle spoglie di organismi animali e vegetali.

**Orizzonte**

Ognuno dei livelli sovrapposti di un suolo: si distingue per composizione e colore.

**Pedologia**

Scienza che studia la formazione e le caratteristiche dei suoli.

**Permafrost**

Strato perennemente ghiacciato del sottosuolo delle regioni polari.

**Porosità**

Caratteristica di un suolo che indica il gra-

do in cui esso è permeato da pori e interstizi e viene indicata come rapporto tra volume degli spazi vuoti e il volume totale del suolo.

**Potenzialità**

Caratteristica di un suolo che ne indica le possibilità d'impiego, essenzialmente in campo agricolo-forestale.

**Profilo pedologico**

La successione dei diversi orizzonti presenti in un suolo.

**Scheletro**

Parte della componente minerale di un suolo formata da granuli con diametro maggiore di 2 mm.

**Tessitura**

Caratteristica di un suolo che indica la percentuale relativa di scheletro, sabbia, limo e argilla presenti.

## TEST DI VERIFICA

**1** La coltre di sostanza organica indecomposta ricoprente il suolo è detta:

- a** mull;
- b** moder;
- c** mor;
- d** torba;
- e** storage.

**2** La potenzialità di un suolo deriva dalla quantificazione di parametri:

- a** chimici;
- b** fisici;
- c** biologici;
- d** tutte le alternative.

**3** Il suolo si compone di orizzonti, contraddistinti dalle lettere:

- a** O, A, B, C, R;
- b** A, C, R;
- c** O, A, B, C;
- d** A<sub>1</sub>, B, C, R.

**4** Tra i caratteri pedologici fondamentali si riconosce:

- a** tessitura, porosità;
- b** attività di scambio, struttura, colore;
- c** tessitura;
- d** risposta a e b.

**5** I suoli più fertili sono quelli a:

- a** medio impasto;
- b** medio impasto, tessituralmente equilibrati;
- c** impasto fine;
- d** impasto grossolano.

# 23 L'uomo e il rischio naturale

*Finora sono stati descritti numerosi fenomeni che si manifestano sulla superficie terrestre e sono conseguenza delle forze endogene ed esogene che agiscono incessantemente sul nostro pianeta; sono i **fenomeni naturali** che continuamente modificano l'aspetto della Terra e ne modellano i rilievi. Tuttavia, fenomeni sismici e vulcanici, frane, straripamenti di fiumi e valanghe **assumono l'aspetto di rischi naturali** se si considerano i **danni** che essi possono provocare **nei confronti dell'uomo e delle sue costruzioni**. Le uniche possibilità d'intervento dell'uomo contro i rischi naturali consistono nella loro **previsione** e nella **prevenzione**, per cercare di limitare i danni che possono provocare, economici e di vite umane. Inoltre, mentre il **rischio sismico** e il **rischio vulcanico** sono essenzialmente legati a cause naturali, altre calamità, quali le **frane**, le **alluvioni**, le **valanghe** e la **desertificazione**, sono fortemente condizionate dall'attività umana.*

## 23.1 Il rischio sismico

Il termine **rischio sismico** indica la probabilità che in una determinata zona si possa verificare un terremoto. Un ampio spazio è stato dedicato alla registrazione e alla localizzazione dei terremoti nel capitolo 15 (v. a p. 178), relativo alla sismicità.

Per quanto riguarda l'Italia è stato messo a punto un **Catalogo dei terremoti**, che ne elenca 25 000 e tiene conto di 1000 anni di attività sismica nella nostra penisola. In base alla frequenza con cui in passato in certe zone si sono verificati i sismi, sono state elaborate **carte di zonazione sismica**, nelle quali tutto il territorio italiano è stato diviso in aree a sismicità elevata, media, bassa o asismiche, se il rischio sismico è nullo.

Il "Catalogo dei terremoti" e le carte di zonazione sismica

## 23.2 Il rischio vulcanico

Il **rischio vulcanico**, cioè la probabilità che in una determinata zona si possa verificare un'eruzione in rapporto ai danni che essa può provocare, non si deve pensare legato a un evento eccezionale: infatti, molti vulcani, anche se inattivi da decine o centinaia di anni, possono riprendere la loro attività, come si è già verificato in diversi casi (v. cap. 14).

Tuttavia, poiché la localizzazione dei vulcani è ben nota, gli interventi di previsione e di prevenzione possono essere più efficaci che nel caso dei sismi.



	<p>La pericolosità di un vulcano dipende dal tipo di eruzione a cui esso dà luogo.</p>
Nelle eruzioni di tipo effusivo	<p>Le <b>eruzioni di tipo effusivo</b>, a causa della limitata velocità di flusso delle colate laviche, sono generalmente le meno pericolose per la vita delle persone: si ha, infatti, tutto il tempo necessario per evacuare la zona, mentre si possono comunque avere effetti distruttivi sulle zone edificate, industriali e agricole. Tipico esempio di questa situazione per l'Italia è rappresentato dall'attività dell'Etna, quasi mai pericolosa per la popolazione per le colate laviche, ma che può provocare danni alle abitazioni e alle colture specie per l'apertura di bocche vulcaniche a bassa quota.</p>
Nelle eruzioni di tipo esplosivo	<p>Nelle <b>eruzioni di tipo esplosivo</b> la situazione è ben più grave, in quanto sono caratterizzate dall'emissione di grandi quantità di piroclasti, i materiali solidi eiettati dal vulcano, e di gas: in questo caso risulta chiaro quanto il costo in vite umane sia maggiore e quanto siano pericolosi gli insediamenti sulle pendici vulcaniche.</p> <p>Il Vesuvio, per esempio, è un vulcano molto pericoloso e perciò costantemente monitorato dall'Osservatorio Vesuviano. La sua ultima eruzione è avvenuta nel 1944 e ancora si ricorda il disastro di Pompei ed Ercolano nel 79 d.C. Il rischio vulcanico in tutta l'area è elevatissimo: ecco perché è pericoloso continuare a costruire altre abitazioni attorno al Vesuvio. Diverse sono le misure di previsione e di prevenzione che si possono mettere in atto per ridurre i danni provocati dalle eruzioni.</p>
La previsione delle eruzioni	<p>La <b>previsione di un'eruzione</b> si basa su:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● studi statistici, riferiti alla periodicità storica dei fenomeni eruttivi della zona in questione;</li> <li>● misurazione del grado di attività di un determinato momento attraverso segni premonitori (per esempio, l'aumento dell'attività sismica con ipocentri poco profondi, i sollevamenti del suolo, gli aumenti di temperatura e le variazioni nella composizione dei gas emessi dal vulcano).</li> </ul>
Carte del rischio vulcanico	<p>Gli studi statistici, insieme a conoscenze sulla morfologia dei siti, sulla meteorologia ecc., permettono di elaborare <b>carte del rischio vulcanico</b>, nelle quali vengono delimitate le aree con diverso grado di pericolosità e dalle quali è quindi possibile ricavare importanti indicazioni sugli interventi di prevenzione e sulle zone in cui essi diventano prioritari.</p>
Le misure di prevenzione	<p>Tra le più importanti <b>misure di prevenzione</b> ricordiamo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● il divieto di costruire in zone a rischio vulcanico;</li> <li>● la progressiva riduzione degli insediamenti nelle zone che siano già occupate dalla popolazione;</li> <li>● la predisposizione di piani di evacuazione, da attuare quan-</li> </ul>

do i segni premonitori indicano che la ripresa dell'attività vulcanica è imminente;

- interventi di informazione e di educazione alla popolazione delle zone a rischio.

Questi interventi sono molto importanti, poiché la previsione, per quanto accurata, non può indicare con precisione il momento in cui si verificherà un'eruzione. Gli sforzi degli studiosi si sono concentrati su quei complessi che possono essere meglio analizzati e in cui le informazioni vanno più indietro nel tempo. Migliorare la previsione consentirà a quel 10% circa della popolazione mondiale che occupa aree pericolose di convivere meglio con il rischio vulcanico.

### 23.3 Il dissesto idrogeologico

Con questo termine si indicano **condizioni di degrado del territorio tali da provocare catastrofi, quali alluvioni e frane, in conseguenza di fenomeni naturali** (per esempio, le precipitazioni meteorologiche) **di notevole intensità o durata**.

Le alluvioni, in terreni pianeggianti, e le frane, in terreni montani e collinari, sono principalmente legate all'azione erosiva delle acque superficiali e alla natura dei suoli; tuttavia, il loro manifestarsi può essere notevolmente ridotto o intensificato dall'attività dell'uomo: per questo motivo assume particolare importanza una corretta gestione del territorio attraverso opportuni interventi di prevenzione.

#### ■ Le alluvioni

Comunemente, per **alluvione** s'intende lo **straripamento delle acque di un fiume o di un torrente**, che si manifesta **in zone pianeggianti in occasioni di piene improvvise**, provocate da precipitazioni di eccezionale durata o intensità: **più precisamente esse vengono indicate col termine di inondazioni** (in geologia, il termine alluvione indica l'accumulo di detriti inorganici e organici che il corso d'acqua deposita man mano che perde velocità).

Dopo essere stata assorbita dal suolo, fino alla sua saturazione, l'acqua piovana scorre in superficie, raggiungendo rapidamente il fondovalle e incrementando di colpo la portata dei torrenti e dei fiumi, da cui straripa se gli argini non sono sufficientemente alti.

Se da un lato il **rischio alluvionale** è legato alle caratteristiche del territorio e ai fenomeni meteorologici, tuttavia alcuni interventi umani aumentano la possibilità che le alluvioni si verifichino. Per esempio, il **disboscamento** favorisce l'incremento della velocità di ruscellamento (scorrimento) delle ac-

Alluvioni, o meglio inondazioni

I fattori di rischio alluvionale

que piovane e, con essa, anche la quantità di detriti che le acque erodono e trasportano nei corsi d'acqua: questi materiali si depositano soprattutto nel basso corso del fiume e contribuiscono a innalzarne il letto fino alla **formazione dei fiumi pensili**, il cui letto fluviale è più alto della pianura circostante. L'incauta **cementificazione** dell'alveo dei fiumi fa aumentare la velocità di scorrimento delle acque fluviali. In questo modo giungono a fondovalle e nelle pianure masse d'acqua assai superiori all'effettiva capacità dell'alveo e si determina l'inondazione, il cui rischio aumenta se il fiume è pensile.

Le misure  
di prevenzione

La probabilità che si verifichino delle alluvioni si riduce attraverso opportune **opere di prevenzione**: tra esse distinguiamo **interventi a monte**, tesi a consolidare i pendii (intensificare il rimboschimento o sistemare gabbioni e reti metalliche di contenimento) e a ridurre la velocità delle acque (ridurre le pendenze del territorio per mezzo di terrazzamenti o regimare le acque di un torrente mediante delle briglie), e **interventi a valle** (lasciare libere da costruzioni le zone golenali, cioè quelle in cui i fiumi sfogano le loro piene, innalzare gli argini e, dove è possibile, dragare il letto dei fiumi per asportare l'eccessivo accumulo di detriti).

## ■ Le frane

Le **frane** sono processi geologici che comprendono tutti i **fenomeni di distacco e di caduta di masse rocciose o di materiali sciolti** dovuti alla gravità, che si manifestano **in zone collinari o montuose**, dove le pendenze sono tali da creare condizioni di instabilità.

Le parti della frana

In una frana si possono riconoscere **tre parti fondamentali**:

- la **zona**, o **nicchia, di distacco**;
- la **zona di accumulo**, o **corpo di frana**;
- l'**alveo di frana**, che corrisponde al tratto percorso dal materiale in movimento.

Nicchia di distacco

La **nicchia di distacco** può essere a contorni netti, delimitata da una scarpata a pendenza maggiore di quella del versante circostante, oppure può essere segnata da una linea incerta, articolata in fessure e fenditure che indicano la probabile prosecuzione del movimento verso monte.

Corpo di frana

Il **corpo di frana** può trovarsi quasi addossato alla nicchia là dove la traslazione è contenuta, oppure, quando il movimento è rilevante, può trovarsi nettamente più a valle. In questo caso il collegamento tra l'elemento iniziale e terminale della frana è dato dall'**alveo di frana**, di forma concava e più o meno allungata, che può in parte essere ricolmato da materiale abbandonato lungo il percorso o dall'apporto di materiale successivo al movimento principale. Quando una frana ha una

Alveo di frana

forte energia cinetica, il materiale franoso può raggiungere la base del versante e risalire in parte il pendio opposto della valle, fungendo da diga provvisoria (v. riquadro).

## CLASSIFICAZIONE DELLE FRANE

A seconda del tipo di materiale che si distacca e del modo in cui avviene lo spostamento, si possono distinguere diversi tipi di frane.

**Frane di crollo:** consistono nella caduta improvvisa di masse di roccia coerente e fratturata, che si stacca secondo piani preesistenti fortemente verticalizzati. Il materiale si accumula in un ammasso di blocchi a spigoli vivi alla base del versante, che in genere è a forte pendenza (fig. a).

**Frane di scivolamento:** il piano di distacco di norma coincide con una superficie di discontinuità del versante (litoclasti o faglia). La posizione del piano più idonea al movimento è a franapoggio, meno inclinato del pendio; il collasso del materiale soprastante è favorito dalla percolazione dell'acqua lungo fessure a monte fino alla superficie predisposta alla rottura. Questo lubrifica la superficie di contatto e pre-dispone per lo scorrimento il pacchetto

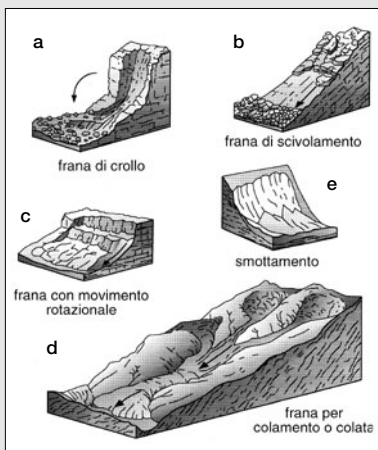
di materiali soprastante (fig. b).

**Frane con movimento rotazionale:** il distacco avviene lungo una superficie di neoformazione, in genere curva. Interessa materiali semicoerenti e si manifesta quando viene superata la resistenza al taglio del materiale costituente il versante (fig. c).

**Frane per colamento:** sono tipiche delle argille imbevute d'acqua. La colata è in genere lenta e durevole nel tempo. Sono sovente molto grandi e possono interessare interi versanti. Il piano di stacco è incerto; si mobilita periodicamente in occasione di eventi pluviometrici (fig. d).

**Smottamenti:** sono piccole frane che coinvolgono la parte più superficiale del substrato se questo è incoerente. Se risultano abbastanza estese prendono anche il nome di **lame** (fig. e).

Sovente le frane sono di tipo misto, per cui non è sempre facile l'attribuzione all'una o all'altra categoria.



*Il tipo di frana è influenzato dal tipo di roccia e dalle caratteristiche del terreno; alcune (come le frane di crollo) si compiono in pochi minuti, altre (come le frane di colamento) possono durare mesi o anche anni.*

## Cause delle frane

Le **cause delle frane** possono essere di tipo predisponente o determinante.

Sono **cause di tipo predisponente** la presenza di forti dislivelli, la persistenza di un piano potenziale di movimento, l'erosione al piede di un versante in roccia coerente, l'incisione di una scarpata artificiale durante la costruzione di una strada.

Sono **cause di tipo determinante** l'appesantimento del versante stesso con una forte nevicata o con manufatti, un sisma improvviso, una pioggia breve e intensa, che imbeve la massa a monte finché non viene superata la resistenza al taglio.

Nel mondo i movimenti franosi provocano migliaia di vittime ogni anno e sono caratteristici dei paesi geologicamente giovani e attivi, dove il territorio non viene adeguatamente protetto; l'Italia è una delle nazioni maggiormente colpite dalle frane.

## Gli interventi di prevenzione

Tra gli **interventi di prevenzione** delle frane e dei danni che possono provocare ricordiamo:

- opere tese a consolidare e stabilizzare i pendii (rimboschimento e sostegni quali muri, gabbioni o reti metalliche);
- limitazioni al tipo di costruzioni sui pendii, in base alla loro costituzione e alla loro stabilità;
- verifica continua del grado di stabilità dei versanti più soggetti a rischio di frane.

## 23.4 Le valanghe

Per **valanga** s'intende la **caduta di grandi masse nevose da un pendio** su cui si erano accumulate in condizioni di instabilità.

## I fattori che influenzano la caduta di valanghe

Tra i **fattori che influenzano la caduta di una valanga** ricordiamo:

- l'**eccesso di precipitazioni nevose**: su versanti ripidi, a causa del peso della massa nevosa depositata e della scarsa coesione con gli strati preesistenti, può verificarsi il distacco di una valanga e il suo scivolamento a valle;
- il **disboscamento**: eliminando l'azione meccanica di contenimento e di riparo dal vento esercitata dagli alberi, il disboscamento facilita sia l'insorgenza, sia la progressione delle valanghe;
- le **variazioni termiche** che si verificano in primavera possono determinare la parziale fusione degli strati nevosi superficiali e il conseguente aumento della loro densità rispetto a quelli profondi, favorendone lo scollamento e lo scivolamento;

● **l'azione meccanica** del vento, di una frana o del passaggio di sciatori, in zone con masse nevose instabili per i motivi suddetti, può innescare il distacco di una valanga. Questi fattori possono presentarsi da soli o associati.

La **protezione dal rischio di valanghe** è attuata **in modo passivo**, per mezzo di barriere paravalanghe fisse, e **in modo attivo**, con il bombardamento o il distacco meccanico delle masse a rischio di caduta, che vengono in questo modo eliminate prima che assumano dimensioni pericolose.

Per tutto il settore italiano delle Alpi è in via di compilazione una **carta delle valanghe**, in cui, tenendo conto della morfologia dei versanti, del clima e di eventuali interventi da parte dell'uomo, sia evidente non solo la localizzazione del fenomeno, ma anche la sua frequenza. Sono emessi, a cura delle regioni, anche **bollettini nivometeorologici**, che indicano il progressivo rischio di valanghe con una scala da 1 a 5.

La protezione dal rischio di valanghe

Carta delle valanghe e bollettini nivometeo

## 23.5 La desertificazione

Per **desertificazione** s'intende **l'espansione dell'ambiente desertico in zone che erano in precedenza semiaride**, a steppa o anche ricoperte di foreste. Produce un progressivo impoverimento dei suoli e la loro polverizzazione, rendendoli così preda della deflazione eolica: il materiale terrogeno si mobilita fino ad accumularsi in dune che si muovono seguendo la direzione del vento.

I processi di desertificazione cominciarono ad essere studiati verso la fine dell'800 e al fenomeno si diede una spiegazione basata su cause esclusivamente naturali, cioè sull'inaridimento del clima.

Più recentemente, l'espansione delle zone aride è stata attribuita all'azione umana, al punto da sostenere che "se la siccità è espressione di un tipo climatico, la desertificazione è opera dell'uomo".

I deserti sono in continua espansione in tutto il mondo: ogni anno una superficie pari a circa 6 milioni di ettari subisce il processo di desertificazione. Il Sahara, il deserto più grande, è andato ampliandosi a cominciare dal periodo arido compreso tra il 1250 e il 1200 a.C.: passando attraverso fasi alterne di diffusa progressione, di temporaneo arresto e di momentaneo regresso, oggi può essere considerato nuovamente in avanzamento.

L'impoverimento dei suoli

Eventi naturali o indotti dall'uomo?

L'espansione dei deserti

### ■ Le cause antropiche della desertificazione

I principali "fattori" antropici di desertificazione sono il pa-

Il pascolo eccessivo

scolo eccessivo, le tecniche agricole inadatte, il disboscamento e l'irrigazione di zone aride.

● **Il pascolo eccessivo.** Fin dagli albori della civiltà, nelle steppe semiaride di tutto il mondo l'allevamento del bestiame è praticato attraverso il nomadismo. Se le mandrie si muovono lungo percorsi prestabiliti, con cadenze note e con numero di capi che resta grosso modo costante nel tempo, gli stessi luoghi sono ripercorsi dopo intervalli lunghissimi, talvolta dell'ordine di 15-20 anni: le pause permettono alla cotica erbosa di rigenerarsi, in un ambiente estremamente poco fertile per la scarsità d'acqua.

**L'equilibrio esistente** ormai da molti secoli in queste zone è stato compromesso da due fattori concomitanti: **la creazione di confini nazionali**, come conseguenza dei processi di decolonizzazione, e **l'aumento della popolazione animale**.

La creazione di confini nazionali ha ostacolato le migrazioni per il pascolo degli animali e le mandrie sono state costrette a sostare troppo a lungo negli stessi luoghi e ad abbreviare gli intervalli tra gli avvicendamenti sugli stessi pascoli: ciò ha provocato **un maggior consumo della copertura vegetale e dei suoi apparati radicali**, che, se presenti, agiscono proteggendo il suolo dall'erosione e dal processo di desertificazione.

Un **involontario contributo** al disastro si deve ai **programmi di aiuto al Terzo Mondo** da parte dei paesi occidentali: l'invio gratuito di migliaia di capi di bestiame ha fatto aumentare la popolazione animale ben oltre il limite che i pascoli della zona avrebbero potuto sopportare. Così, in pochi anni, vastissime distese di savane e steppe sono state compromesse e trasformate in campi di dune mobili.

Le tecniche agricole inadatte

● **Le tecniche agricole inadatte.** I suoli vengono sottoposti a **forme rudimentali e inefficienti di agricoltura intensiva**, senza più rispettare le antiche consuetudini di turnazione delle colture o di riposo periodico: ne deriva una rapidissima diminuzione dell'efficienza biologica dell'ambiente, con la compromissione dei raccolti, l'abbandono delle terre e la consueta deflazione eolica delle superfici denudate.

Il disboscamento

● **Il disboscamento.** L'aumento della popolazione, insieme con il forte incremento del fabbisogno energetico pro capite, si rivela letale per i **magri boschi ai margini dei deserti, distrutti dall'obbligo impellente di reperire sempre nuovo combustibile**: tale pratica, sconosciuta nella società nomade, presso cui anche le semplici necessità di cottura del cibo vengono soddisfatte dal ciclo animale tramite l'essiccamento dello sterco, provoca la distruzione del bosco, la conseguente variazione del microclima al suolo e la pro-

gressiva compromissione degli arbusti, fino all'irreversibile deperimento dell'associazione vegetale nel suo complesso.

● **L'irrigazione delle zone aride.** Molti suoli aridi sono particolarmente ricchi di sali minerali di vario genere: l'irrigazione di suoli salini può avere come conseguenza la mobilitazione di ioni presenti nel terreno, in particolare di quelli più solubili come il sodio. La forte evaporazione, poi, ne favorisce la risalita per capillarità fino agli strati più superficiali e ciò comporta una vera e propria "alcalinizzazione" del profilo del suolo, con un'ulteriore riduzione della sua fertilità.

L'arresto dei processi di desertificazione è legato a una delle due condizioni seguenti:

- a) un cambiamento climatico (che è un fenomeno naturale globale e, ovviamente, spontaneo e non prevedibile);
- b) un intervento dell'uomo, oggi considerato la via più efficace per arrestare la desertificazione (v. riquadro).

L'irrigazione  
delle zone aride

## INTERVENTI CONTRO LA DESERTIFICAZIONE

Con opportuni interventi da parte dell'uomo, è possibile invertire la tendenza all'aumento dell'estensione dei deserti e, anzi, bonificare, cioè recuperare alla coltivazione territori prima desertici. Interventi di questo tipo sono stati attuati con successo nel deserto del Negev (Israele) e nella penisola del Sinis (Sardegna).

La **bonifica del Negev** è stata attuata dopo la creazione dello stato di Israele. Si è basata su tre azioni: il reperimento di risorse idriche, le tecniche di irrigazione e la collaborazione tra ricerca scientifica e produzione.

**1. Il reperimento di risorse idriche** è stato possibile tramite la perforazione di numerosi pozzi, in grado di captare falde profonde prima non sfruttate, e la canalizzazione delle acque del fiume Giordano.

**2. Le nuove tecniche di irrigazione** sono consistite nell'ideazione, collaudo e diffusione dell'irrigazione a goccia (distribuzione dell'acqua facendola uscire goccia a goccia da un tubo forato solo immediatamente vicino alle piante), attuata con impianti fissi d'irrigazione, in collegamento ad altri aerei e a sistemi di serre: queste nuove tecniche di irrigazione hanno consentito un notevole risparmio di acqua.

**3. La collaborazione ricerca scientifica-produzione**, ereditata dal modello americano e perfezionata, ha permesso di rendere immediatamente operative scoperte scientifiche e innovazioni tecnologiche. Valgono per tutti i metodi di irrigazione automatica con impianti rotanti o in traslazione rettilinea, che sono ormai adottati ovunque si pratici l'aridocoltura, cioè una forma di agricoltura che permette di usare una minor quantità di acqua per l'irrigazione.

La **penisola del Sinis**, in Sardegna occidentale a nord del Golfo di Oristano, negli anni '50 era in stato di avanzata desertificazione a causa dell'eccesso di pascolo. Il recupero venne attuato attraverso un intervento amministrativo, che interdì il pascolo al di sotto dell'isoipsa dei 50 metri (che esclude l'intera penisola), la fissazione delle dune con piante specifiche, l'impianto di colture aridofile (cioè in grado di sopportare prolungati periodi di siccità) e infine la progettazione di imponenti sistemi di irrigazione.

Programmi di bonifica di zone desertiche simili a quelli descritti si stanno oggi sviluppando in varie parti del mondo.



## GLOSSARIO

**Alluvione**

Evento catastrofico in seguito al quale un corso d'acqua fuoriesce dal proprio alveo inondando le zone circostanti.

**Desertificazione**

Expansione dell'ambiente desertico in aree che precedentemente erano semi-desertiche.

**Deforestazione**

Eliminazione di alberi da una determinata zona per ottenere legname e nuove superfici coltivabili o edificabili; può provocare l'impovertimento biologico della zona (riduzione della biodiversità) e aumentare i rischi di frane, smottamenti e inondazioni.

**Dissesto idrogeologico**

Condizione di degrado del territorio ta-

le da provocare catastrofi, quali alluvioni e frane, in conseguenza di precipitazioni di eccezionale intensità o durata; è dovuto all'azione erosiva delle acque superficiali e alla natura dei suoli, ma può essere intensificato dall'attività dell'uomo.

**Frana**

Crollo e scivolamento di materiale roccioso lungo i pendii.

**Periodo di ritorno**

In statistica, periodo di tempo che separa due eventi naturali di intensità simile.

**Rischio naturale**

Possibilità che in natura si verifichi un evento catastrofico, a volte indipendente dalla volontà umana, altre volte da essa condizionato.

## TEST DI VERIFICA

**1 Che cosa indicano le carte del rischio sismico?**

**2 Sono più pericolosi per la popolazione i vulcani con eruzioni:**

- a** di tipo esplosivo;
- b** di tipo effusivo;
- c** hanno entrambi lo stesso grado di pericolosità.

**3 Quali sono le parti che costituiscono una frana?**

- a** .....
- b** .....
- c** .....

**4 Interventi di prevenzione delle valanghe sono:**

- a** cementificazione degli alvei fluviali;
- b** rimboschimento;
- c** innalzamento degli argini;
- d** terrazzamenti.

**5 Quali sono le cause che determinano la caduta di valanghe?**

**6 Indica alcuni tipi di interventi contro la desertificazione.**

**7 Regimando le acque dei torrenti mediante briglie, si può intervenire sul rischio:**

- a** sismico;
- b** di alluvione;
- c** di frana;
- d** di valanga.

R

1 v. a p. 303; 2 a: 3 v. a p. 306; 4 b, d; 5 v. a p. 308-309; 6 v. a p. 311; 7 b.

# 24 Le risorse minerarie

---

*Ci siamo finora occupati della Terra soprattutto dal punto di vista astronomico, geologico e geomorfologico; tuttavia, essa è anche un'importante fonte di risorse naturali utili all'uomo, sia per la sua sopravvivenza, sia per le sue molteplici attività. In questo capitolo descriveremo le **risorse minerarie**, cioè l'insieme delle sostanze minerali che vengono estratte dai rispettivi **giacimenti**, estensioni di crosta terrestre in cui uno o più minerali si trovano concentrati in quantità tale da rendere economicamente conveniente l'estrazione. In base al tipo di origine, si possono distinguere **giacimenti magmatici**, **sedimentari** e **metamorfici**. Quelle minerarie sono **risorse non rinnovabili** e le loro riserve sulla Terra non sono illimitate, per cui si pone oggi la necessità di un loro **uso più razionale**, in particolare praticandone il **riciclo**.*

## 24.1 I giacimenti minerari

Si definisce **giacimento** un'estensione di crosta terrestre in cui uno o più minerali si trovano concentrati nelle rocce con abbondanza particolare. Si parla di **giacimento minerario** se tali minerali hanno applicazioni industriali e quindi un valore commerciale e se, inoltre, si verificano condizioni adatte al loro sfruttamento economico.

Non tutti i minerali che costituiscono la crosta terrestre sono sfruttati dall'uomo, o perché sono estremamente rari, o perché il loro contenuto in elementi utili (in particolare metallici) è molto basso, tanto da rendere lo sfruttamento non conveniente sul piano economico.

Per valutare l'opportunità di sfruttare un giacimento, si tiene conto innanzitutto del **tenore del minerale presente**, cioè della sua concentrazione nelle rocce: sono oggi disponibili tecnologie che rendono possibile lo sfruttamento di giacimenti con tenore del minerale utile molto basso (anche inferiore all'1%). Si prendono poi in considerazione anche altri fattori, quali la **facilità di estrazione**, le **dimensioni del giacimento** e la sua **localizzazione**, le **richieste di mercato** ecc. Le **miniere** sono l'insieme delle strutture destinate all'estrazione e alla separazione dei minerali da un giacimento nel sottosuolo o in superficie (v. riquadro a p. 314).

Fattori di sfruttabilità  
dei giacimenti

## LE MINIERE

La preparazione di una miniera è preceduta da una fase di **prospezione**, cioè un'esplorazione indiretta del sottosuolo eseguita con diversi metodi (sismici, gravimetrici, elettrici o magnetici), che permette di localizzare i giacimenti eseguendo delle misurazioni sulla superficie del suolo e anche nel sottosuolo, lungo pozzi e gallerie.

Segue, quindi, una fase di **ricerca**, per determinare le caratteristiche e le dimensioni del giacimento, la natura e le proprietà dei minerali contenuti.

Si sceglie quindi il metodo di **coltivazione**, cioè di sfruttamento e di estrazione, più adatto, a seconda che si tratti di giacimenti costituiti da filoni, strati o ammassi. Si sistemano poi le vie di accesso: il pozzo principale di estrazione, le varie gallerie di carriaggio per il trasporto dei minerali al pozzo principale, le gallerie di direzione che seguono il giacimento, le gallerie di servizio e quelle di ventilazione. Contemporaneamente si organizzano i vari cantieri di coltivazione nel sottosuolo, i sistemi di ventilazione, le installazioni per l'energia elettrica e per la distribuzione dell'aria compressa, necessarie per far funzionare le attrezzature per l'abbattimento dei minerali.

Per il trasporto dei minerali nel sottosuolo sono usati vagoncini che scorrono su

binari, veicoli gommati o su nastri trasportatori. Per la discesa e la salita dei materiali vengono impiegati dei montacarichi collegati alla zona di arrivo dei vagoncini o ai nastri trasportatori e, in superficie, a treni, nastri trasportatori o autocarri. Il sistema di ventilazione della miniera può essere a tiraggio naturale, tramite un camino verticale, se la miniera è poco profonda, oppure a tiraggio forzato, mediante ventilatori che fanno fluire l'aria fresca dal pozzo principale ai vari cantieri, dove – oltre ad asportare i fumi degli esplosivi impiegati per l'abbattimento delle rocce, i gas prodotti dalla combustione dei motori e il pulviscolo formatosi nelle lavorazioni – impedisce il formarsi di concentrazioni pericolose di gas esplosivi (grisou). Per il prosciugamento delle acque, che continuamente penetrano in miniera, si ricorre al loro sollevamento meccanico con pompe adeguate, installate al livello più profondo.

In superficie vengono di solito installati gli impianti per la compressione dell'aria, i generatori di corrente per alimentare i vari dispositivi elettrici, le apparecchiature per la preparazione meccanica dei minerali (impianti di flottazione, laverie gravimetriche, forni di calcinazione ecc.), l'officina meccanica di manutenzione e i servizi di trasporto dei minerali.

## 24.2 Genesi e classificazione dei giacimenti

In base alla loro origine, i giacimenti vengono classificati in: magmatici, sedimentari e metamorfici.

Inoltre, i giacimenti minerari possono essere distinti in:

- **primari**, se i minerali si ritrovano nel luogo in cui si sono formati (genesì di origine magmatica), ulteriormente suddivisi in **sigenetici** (quando l'origine del giacimento è contemporanea alla formazione della roccia) o **epigenetici** (quando il giacimento si è formato secondariamente);
- **secondari**, se i minerali sono stati rimaneggiati, cioè depositi in un luogo e trasportati e accumulati in un altro (genesì di origine sedimentaria e metamorfica).

Giacimenti primari

Giacimenti  
secondari

## ■ Giacimenti magmatici

Derivano dal raffreddamento di masse fuse di origine magmatica. In base al tipo di giacitura geologica, si possono formare **ammassi**, o **lenti**, per il riempimento di cavità presenti nelle rocce da parte del magma, oppure **filoni**, per il riempimento di fratture.

In base all'appartenenza a uno dei successivi stati di consolidazione e di differenziazione di un magma, si possono inoltre distinguere giacimenti:

- **ortomagmatici**, che si formano a elevate temperature, maggiori di 750 °C;
- **pegmatitici**, legati a residui liquido-magmatici, ricchi di gas, con temperature comprese tra 750 e 550 °C;
- **pneumatolitici**, derivati da gas e vapori di origine magmatica, con temperature di circa 550-400 °C;
- **idrotermali**, derivati dalla precipitazione di minerali disciolti in soluzioni acquose circolanti in un magma, con temperature inferiori a 400 °C.

## ■ Giacimenti sedimentari

Si formano in prevalenza in superficie, ma possono generarsi anche in profondità per rideposizione di sostanze trasportate dalle acque superficiali percolanti nel sottosuolo. A seconda delle modalità di formazione, possiamo classificare i giacimenti sedimentari in tre categorie principali: detritici, chimici e organogeni.

Nei **giacimenti detritici** la concentrazione di minerali utili è dovuta all'azione di trasporto e di deposito dell'acqua di ruscellamento superficiale, dei fiumi, delle acque marine o del vento. I luoghi in cui si formano i giacimenti corrispondono ai punti dove l'energia dell'agente di trasporto diminuisce: tanto più brusca e improvvisa è la caduta di energia, tanto più concentrato è il deposito che si genera.

I **giacimenti detritici** più comuni e importanti sono quelli di **natura alluvionale**: i minerali adatti a concentrarsi sono quelli pesanti, insolubili in acqua (al contrario, se fossero leggeri si depositerebbero con difficoltà e resterebbero mescolati ad altri minerali non pregiati di densità simile).

I **giacimenti chimici** sono conseguenti al deposito di sostanze trasportate in soluzione, la cui concentrazione è dovuta, in genere, all'evaporazione dell'acqua. L'evaporazione può interessare bracci di mare che restano isolati dal resto degli oceani, laghi che si prosciugano per cambiamenti climatici ecc. Questi depositi sovente sono **stratificati** e variano di composizione dal basso verso l'alto (i primi a precipitare sono i sali meno solubili), raggiungendo talvolta grandi spes-

Giacimenti detritici

Giacimenti alluvionali

I giacimenti chimici

I giacimenti organogeni

sori. Si sono formati in questo modo i giacimenti di gesso (solfato di calcio biidrato) e di salgemma (cloruro di sodio). I **giacimenti organogeni** sono dovuti ad accumuli di **sostanza organica**, che successivamente subisce un processo di trasformazione (**diagenesi**): tra essi ricordiamo il carbone, il petrolio e il guano.

Carbone

Il **carbone** è una sostanza combustibile solida, composta in prevalenza da carbonio, che brucia con reazione fortemente esotermica. È derivata dalla lenta e più o meno prolungata trasformazione di residui vegetali rimasti coperti da materiale sedimentario; a seconda del crescente grado di trasformazione, i carboni si distinguono, nell'ordine, in torba, lignite, litantrace e antracite. Per il processo di formazione del carbone e la classificazione delle diverse qualità si rimanda al capitolo 9, a p. 118.

Petrolio

Il **petrolio** è una complessa miscela di idrocarburi solidi, liquidi e gassosi e, in minor quantità, di composti ossigenati, solforati e azotati, che si presenta a temperatura ambiente come un liquido più o meno denso, oleoso, infiammabile, di colore variabile dal giallastro al nero. Si forma per decomposizione di sostanze organiche in rocce sedimentarie e, per effetto delle forti compressioni operate dal carico di sedimenti sovrastanti, si trasferisce in formazioni rocciose porose e permeabili (v. riquadro a p. 317).

Guano

Il **guano** è una sostanza che si forma dalla decomposizione incompleta di escrementi di uccelli marini. È ricco di sali di fosforo, potassio e azoto e viene impiegato come **fertizzante**; si forma in zone a clima caldo e asciutto, dando origine a depositi il cui spessore può superare i 20 m (quelli più antichi possono trasformarsi in vere e proprie rocce fosfatiche).

Altri tipi di giacimenti sedimentari

Tra i giacimenti sedimentari si possono ricordare ancora i **giacimenti biochimici**, dovuti a processi in parte biologici e in parte chimici, e i **giacimenti per concentrazione residuale**, alla cui origine si ritrovano intensi processi di alterazione della roccia esposta agli agenti atmosferici. Per esempio, la **bauxite**, il minerale dal quale si estrae alluminio, è il prodotto tipico dell'alterazione delle rocce silicatiche in condizioni di clima tropicale o subtropicale (caratterizzato da una lunga stagione umida alternata a una secca). Con il passare del tempo i minerali più solubili vengono dilavati, mentre quelli di alluminio si concentrano progressivamente.

### ■ Giacimenti metamorfici

Derivano dall'azione termica, dinamica o chimica del metamorfismo geologico, per esempio in occasione dei proces-

## IL PETROLIO

Il petrolio è una complessa miscela di idrocarburi naturali solidi, liquidi e gassosi, contenente anche piccole quantità di composti organici ossigenati, solforati e azotati.

Il petrolio è il combustibile di origine fossile attualmente più sfruttato dall'uomo, non solo per ricavarne carburanti per autotrazione e combustibili, ma anche per estrarne derivati utilizzati come prodotti di partenza per la fabbricazione di materie plastiche.

Il petrolio si è formato in seguito a trasformazioni subite da materiali biologici, per esempio, plancton e animali marini, che si sono depositati insieme a sedimenti minerali. L'ambiente di accumulo ideale è dato da bacini tranquilli: lagune, paludi litoranee, bacini salmastri costieri, in cui l'assenza di eccessivi movimenti e di norma il maggior calore dell'acqua favoriscono lo sviluppo di protozoi, molluschi e al-

tri organismi. Alla loro morte, questi si depositano sul fondale, dove vengono sepolti da veli di argilla impermeabile. Si formano così ambienti isolati dall'esterno, in cui la decomposizione è incompleta. Questo fango, chiamato sapropel, diventa il costituente fondamentale della **roccia-madre**. Il peso dei sedimenti e le reazioni chimiche che cominciano a instaurarsi all'interno della roccia-madre trasformano il sapropel in una miscela di idrocarburi gassosi e liquidi. Dopo la formazione, il petrolio generalmente migra dalla roccia-madre alle **rocce-serbatoio**, dove può venire bloccato da una copertura di rocce impermeabili che ne ostacola l'ulteriore migrazione. Il petrolio può giungere spontaneamente in superficie, ma di solito viene estratto dal sottosuolo tramite trivellazioni che si sono spinte fin oltre gli 11 000 m di profondità.

si di formazione delle grandi catene montuose o a causa delle trasformazioni indotte da una massa magmatica. Esempi di giacimenti metamorfici sono quelli di talco e di grafite.

## 24.3 L'esaurimento delle risorse minerarie

Le risorse minerarie sono non rinnovabili, cioè non possono essere ricostituite via via che vengono consumate o, Risorse non rinnovabili

**Tabella 24.1** Stima della durata di alcune risorse minerarie ai tassi di consumo attuali

	DURATA ANNI	
	I	II
alluminio	256	805
rame	41	277
cobalto	109	429
molibdeno	67	256
nicel	66	163
gruppo del platino	225	413
carbone	206	3226
petrolio	35	83

I: riserve vantaggiosamente sfruttabili con le tecnologie attuali; II: riserve totali stimate

## Le riserve

meglio, non possono essere ricostituite con la stessa velocità con cui vengono consumate. Infatti, per la loro rigenerazione sono richiesti periodi lunghissimi: basti pensare, per esempio, ai tempi richiesti per la formazione dei giacimenti di carbone e di petrolio che stiamo sfruttando attualmente. Le **riserve** di tali risorse, cioè le quantità presenti in giacimenti sfruttabili con le tecnologie di cui oggi disponiamo, non sono illimitate e, supponendo che i consumi proseguano ai livelli attuali, esse potrebbero esaurirsi in tempi relativamente brevi (tab. 24.1).

Pur tenendo conto che le riserve totali stimate sono superiori a quelle attualmente sfruttabili con le tecnologie disponibili, si impone in ogni caso come obiettivo prioritario un uso più razionale delle risorse minerali, sia attraverso la **riduzione dei consumi**, sia attraverso il **recupero** e il **riciclo** dei materiali metallici usati.

## GLOSSARIO

### Diagenesi

Insieme di processi chimico-fisici che si verificano all'interno di un sedimento tra i minerali che lo costituiscono, o tra questi e le soluzioni che circolano nel sedimento, dal momento della sua deposizione fino alla formazione di roccia sedimentaria.

### Filone

Massa intrusiva, tabulare, situata entro fenditure della roccia incassante.

### Giacimento

Deposito di minerali utili, che può essere convenientemente sfruttato.

### Guano

Concime naturale formato dall'accumulo e dalla decomposizione di escrementi di uccelli marini.

### Prospezione

Esplorazione indiretta del sottosuolo tramite indagini e studi eseguiti sul terreno per localizzare, per esempio, dei giacimenti.

## TEST DI VERIFICA

**1** Trova la definizione esatta dei seguenti termini:

- a** giacimento minerario;
- b** antracite;
- c** guano;
- d** giacimento secondario.

**2** Se i minerali si ritrovano nel luogo in cui si sono formati, il giacimento è detto:

- a** primario;
- b** secondario;
- c** singenetico;
- d** epigenetico.

**3** I giacimenti di talco e di grafite sono di origine:

- a** magmatica;
- b** metamorfica;
- c** sedimentaria.

**4** I giacimenti di salgemma e di gesso sono di origine:

- a** magmatica;
- b** metamorfica;
- c** sedimentaria.

**5** Indica la natura e la genesi di un giacimento alluvionale.

**R**

1 v. a pp. 313-316; 2 a; 3 b; 4 c; 5 v. a p. 315.



# **TUTTO SCIENZE DELLA TERRA**

## **UN'OPERA PER INFORMARSI, STUDIARE, RIEPILOGARE**

### **LO STUDIO**

- **IN 24 CAPITOLI LE SCIENZE DELLA TERRA: L'UNIVERSO, IL PIANETA TERRA, L'AMBIENTE**
- **CENNI DI ASTRONOMIA, LA STRUTTURA DELLA TERRA, ROCCE E MINERALI, DINAMICA DELLA LITOSFERA, IDROSFERA E ATMOSFERA, GEOMORFOLOGIA, RISCHI NATURALI E RISORSE**
- **SCHEDE DI APPROFONDIMENTO E DISEGNI ESPLICATIVI**

### **LA SINTESI**

- **INTRODUZIONE AI CAPITOLI PER INQUADRARE GLI ARGOMENTI**
- **GLOSSARI DEI TERMINI E DEI CONCETTI DA RICORDARE**
- **TABELLE E SCHEMI RIASSUNTIVI**
- **TEST PER AUTOVERIFICARE L'APPRENDIMENTO**